



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย การบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟสังเคราะห์โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า  
ร่วมกับกระบวนการเฟนตัน

Treatment of Synthetic Reactive Dye Wastewater by Electrocoagulation Process  
with Fenton Process

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์สุรีย์ กรบุญรักษา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้  
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560  
มหาวิทยาลัยบูรพา

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย การบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟสังเคราะห์โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า  
ร่วมกับกระบวนการเฟนตัน

Treatment of Synthetic Reactive Dye Wastewater by Electrocoagulation Process  
with Fenton Process

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์สุรีย์ กรบุญรักษา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ปีงบประมาณ 2560

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 35/2560

## Acknowledgement

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant no. 35/2560).

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟสังเคราะห์โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้ากับกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าตามด้วยกระบวนการเฟนตัน แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง การทดลองที่หนึ่งคือการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการเฟนตัน ที่มีการใช้แผ่นอิเล็กโทรดชนิดแผ่นเหล็กและแผ่นอลูมิเนียม ทำการทดลองที่ค่า pH 7 และค่า pH 10 ที่ปริมาณของกระแสไฟฟ้า 2, 4 และ 6 แอมแปร์ ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาที นาน 60 นาทีต่อเนื่อง และการทดลองที่สองคือการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าตามด้วยเฟนตัน โดยทำการเปรียบเทียบเงื่อนไขการเดินระบบ 3 รูปแบบ คือ (1) การใช้การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยแผ่นเหล็กร่วมกับ  $H_2O_2$  (2) การทดลองการทำปฏิกิริยากับ  $Fe^{2+}$  กับ  $H_2O_2$  และ (3) การทดลองการทำปฏิกิริยากับ  $Fe^{3+}$  กับ  $H_2O_2$  และศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโดยพิจารณาจากค่า pH, color, turbidity, TDS, conductivity, COD, sCOD, Pb และ Cr และวิเคราะห์ปริมาณอลูมิเนียมและเหล็กไอออนที่คงเหลือในน้ำภายหลังการบำบัด (Residual Aluminum หรือ Residual Iron) ผลการศึกษาพบว่า การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า พบว่า การเดินระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (EC) ด้วยแผ่นเหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ ระยะเวลา 30 นาที เป็นสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบในเชิงคุณลักษณะของน้ำที่บำบัด และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด ในขณะที่กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (EC) ตามด้วยกระบวนการเฟนตันที่เงื่อนไขการทดลอง คือ การใช้ EC แผ่นเหล็ก ที่ pH 10 ตามด้วยการเติม  $H_2O_2$  ที่ความเข้มข้น 50 mg/L ทำให้คุณลักษณะของพารามิเตอร์ต่างๆ ในเสียได้ขึ้นได้แก่ ค่าสี ความขุ่น การกำจัดโลหะหนักในรูปตะกั่ว (Pb) และโครเมียม (Cr) แต่จะทำให้ค่า COD และ sCOD ในตัวอย่างน้ำเพิ่มสูงขึ้น สำหรับการวิเคราะห์หาต้นทุนการดำเนินการ พบว่า การบำบัดน้ำเสียการเดินระบบ EC ด้วยแผ่นเหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ ค่า pH 10 ระยะเวลา 30 นาที มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดเพียง 47.36 บาท/ม<sup>3</sup>

## Abstract

The objectives of this study were determined the treatment efficiency of synthetic reactive dye wastewater by electrocoagulation process and electrocoagulation process followed by Fenton process. Two experiments were examined. Firstly, dye wastewater treatment by electrocoagulation process with the conditions of pH 7 and pH 10 and current of 2A, 4A and 6A. Interval sampling time was done every 10 mins for one hour continuously. A second experiment was investigated based on Fenton process and three subset experiments where (1) electrocoagulation process with  $\text{H}_2\text{O}_2$  (2) chemical reaction between  $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$  and (3) chemical reaction between  $\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O}_2$ . Removal treatment efficiencies were considered based on pH, color, turbidity, TDS, conductivity, COD, sCOD, Pb and Cr. Residual aluminum and residual iron also were examined. The results found that electrocoagulation process with an iron electrode at 2A, 30 min was the best condition. Due to the high performance of treated wastewater and less time consuming. While electrocoagulation process using iron electrode followed by Fenton process, electrocoagulation process with  $\text{H}_2\text{O}_2$ , was the good conditions in the second experiment. Higher removal efficiencies were observed in color, turbidity, Pb and Cr while lower removal efficiencies were observed in COD and sCOD. The operating cost for dye wastewater treatment using electrocoagulation process (and iron electrode), with current of 2A at pH 10 for 30 min, was lowest cost only 47.36 baht/  $\text{m}^3$ .

## สารบัญเรื่อง

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
ขอบเขตของงานวิจัย	2
ประโยชน์ที่ได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
คุณลักษณะของน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ	4
ชนิดของสีย้อม	7
เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ	8
เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสี	11
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า	14
ข้อดี-ข้อด้อยของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า	16
กระบวนการเฟนตัน	17
<b>บทที่ 3 วิธีการทดลอง</b>	<b>19</b>
การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์	19
การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า	19
การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการเฟนตัน	19
การบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าตามด้วยเฟนตัน	20
การวิเคราะห์หาต้นทุนการดำเนินการ	20
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	<b>22</b>
คุณลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ	22
การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า	23
การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าตามด้วยเฟนตัน	30
การวิเคราะห์หาต้นทุนการดำเนินการ	36
<b>บทที่ 5 สรุปผล</b>	<b>40</b>
สรุปผลการทดลอง	40
ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก	44
ประวัตินักวิจัย	60

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1	คุณลักษณะของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ	4
ตารางที่ 2-2	การประยุกต์ใช้กระบวนการ Electrocoagulation ในการบำบัดน้ำเสีย	5
ตารางที่ 2-3	ข้อดีและข้อด้อยของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า	16
ตารางที่ 3-1	พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด	20
ตารางที่ 4-1	คุณลักษณะน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพค่า pH	22
ตารางที่ 4-2	คุณลักษณะน้ำเสียที่ผ่านการปรับสภาพค่า pH แล้ว	22
ตารางที่ 4-3	คุณลักษณะของน้ำเสียที่สังเคราะห์ได้	23
ตารางที่ 4-4	ประสิทธิภาพการกำจัด Pb และ Cr ด้วยวิธีการต่างๆ	35
ตารางที่ 4-5	ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายจากการเดินระบบ EC ด้วยแผ่นเหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์	37
ตารางที่ 4-6	ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายจากการเดินระบบ EC ด้วยแผ่นเหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์	37
ตารางที่ 4-7	ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายจากการเดินระบบ EC ด้วยแผ่นเหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์	38
ตารางที่ 4-8	ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายจากการเดินระบบ EC ด้วยแผ่นอลูมิเนียม ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์	38
ตารางที่ 4-9	ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายจากการเดินระบบ EC ด้วยแผ่นอลูมิเนียม ที่กระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์	39
ตารางที่ 4-10	ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายจากการเดินระบบ EC ด้วยแผ่นอลูมิเนียม ที่กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์	39
ตารางที่ ผ-1	ค่า pH กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 7	44
ตารางที่ ผ-2	ค่า pH กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 10	44
ตารางที่ ผ-3	ค่า pH กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7	45
ตารางที่ ผ-4	ค่า pH กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10	45
ตารางที่ ผ-5	ค่า TDS กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 7	46
ตารางที่ ผ-6	ค่า TDS กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 10	46
ตารางที่ ผ-7	ค่า TDS กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH	47
ตารางที่ ผ-8	ค่า TDS กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10	47
ตารางที่ ผ-9	ค่า Conductivity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 7	48
ตารางที่ ผ-10	ค่า Conductivity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 10	48
ตารางที่ ผ-11	ค่า Conductivity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7	49
ตารางที่ ผ-12	ค่า Conductivity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10	49
ตารางที่ ผ-13	ค่า Turbidity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 7	50
ตารางที่ ผ-14	ค่า Turbidity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 10	50
ตารางที่ ผ-15	ค่า Turbidity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7	51

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ ผ-16 ค่า Turbidity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10	51
ตารางที่ ผ-17 การกำจัดสีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 7	52
ตารางที่ ผ-18 การกำจัดสีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 10	52
ตารางที่ ผ-19 การกำจัดสีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7	53
ตารางที่ ผ-20 การกำจัดสีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10	53
ตารางที่ ผ-21 การกำจัดซีโอต์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 7	54
ตารางที่ ผ-22 การกำจัดซีโอต์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 10	54
ตารางที่ ผ-23 การกำจัดซีโอต์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7	55
ตารางที่ ผ-24 การกำจัดซีโอต์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC ของแผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10	55
ตารางที่ ผ-25 ผลการวิเคราะห์ค่า pH โดยกระบวนการเฟนตัน	56
ตารางที่ ผ-26 ผลการวิเคราะห์ค่า TDS โดยกระบวนการเฟนตัน	56
ตารางที่ ผ-27 ผลการวิเคราะห์ค่า Conductivity โดยกระบวนการเฟนตัน	57
ตารางที่ ผ-28 ผลการวิเคราะห์ค่า Turbidity โดยกระบวนการเฟนตัน	57
ตารางที่ ผ-29 ผลการวิเคราะห์ค่าสีโดยกระบวนการเฟนตัน	58
ตารางที่ ผ-30 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอต์โดยกระบวนการเฟนตัน	58
ตารางที่ ผ-31 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอต์ละลายน้ำโดยกระบวนการเฟนตัน	59



## สารบัญภาพ

ภาพที่ 1-1 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	3
ภาพที่ 2-1 กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย	13
ภาพที่ 4-1 ลักษณะน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ	22
ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาในการทำปฏิกิริยา	24
ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TDS กับเวลาในการทำปฏิกิริยา	25
ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Conductivity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา	26
ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Turbidity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา	27
ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างการกำจัดสีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา	28
ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างการกำจัดซีโอดีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา	29
ภาพที่ 4-8 ผลการวิเคราะห์ค่า pH โดยกระบวนการเฟนตัน	30
ภาพที่ 4-9 ผลการวิเคราะห์ค่า TDS โดยกระบวนการเฟนตัน	31
ภาพที่ 4-10 ผลการวิเคราะห์ค่า Conductivity โดยกระบวนการเฟนตัน	31
ภาพที่ 4-11 ผลการวิเคราะห์ค่า Turbidity โดยกระบวนการเฟนตัน	32
ภาพที่ 4-12 ผลการวิเคราะห์ค่าสีโดยกระบวนการเฟนตัน	33
ภาพที่ 4-13 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยกระบวนการเฟนตัน	33
ภาพที่ 4-14 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีละลายน้ำโดยกระบวนการเฟนตัน	34

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นแหล่งกำเนิดน้ำเสียแห่งหนึ่งที่เกิดปัญหามลพิษต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม เนื่องจากว่าในกระบวนการผลิตมีการใช้น้ำในปริมาณมาก น้ำเสียที่เกิดขึ้นนั้นมักมีสารแขวนลอย (Suspended solids) และสารอินทรีย์ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง อีกทั้งยังมีโลหะหนักหลายชนิดที่ปนเปื้อนมาจากสีย้อม เช่น ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) โคบอล (Co) สังกะสี (Zn) เป็นต้น การบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการบำบัดที่เหมาะสม เพื่อให้มีคุณลักษณะของน้ำทิ้งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ตาม ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ในปัจจุบันมีวิธีการบำบัดหลายวิธีที่สามารถนำมาใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำประเภทสีย้อมและสารเคมีที่เหลืตกค้างอยู่ในน้ำ เช่น การสร้างและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่การตกตะกอนที่เกิดขึ้นในปริมาณมากซึ่งจะยุ่งยากในการนำไปกำจัดต่อไป กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน (Ozone oxidation) สามารถทำลายโมเลกุลของสีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ แต่ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน ความเป็นกรดต่าง และเนื่องจากโอโซนจะทำปฏิกิริยากับสารบางชนิด ทำให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็ง อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ การดูดซับ (Adsorption) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง สามารถกำจัดสีจริงและสีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนตัวดูดซับที่ใช้ไปสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยจะต้องฟื้นฟูสภาพด้วยการเผาที่ความร้อนสูง แต่มีค่าใช้จ่ายสูง และมีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของสีที่จะถูกดูดซับ การกรอง (Filtration) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่สูง แต่มักพบปัญหาการอุดตันของแผ่นกรอง และค่าใช้จ่ายที่ใช้ก็สูงด้วย นอกจากนี้กระบวนการตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation process) ก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีค่อนข้างสูง สามารถใช้บำบัดน้ำเสียในปริมาณที่มากโดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาไม่นาน (ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556) ทั้งนี้ ผลจากการศึกษาวิจัยพบว่ากระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสามารถกำจัดสีในน้ำเสียได้มากกว่า 90% (อังคณา, 2550) โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าทำโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังแผ่นอิเล็กโทรด เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไปกระตุ้นที่ประจุบนแผ่นอิเล็กโทรด ทำให้ประจุบนแผ่นอิเล็กโทรดสามารถละลายออกมาเป็นไอออนอิสระ และมีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคหรือไอออนประจุลบที่อยู่ในน้ำ หลังจากนั้นอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถแยกออกจากน้ำได้ด้วยการปล่อยให้ตกตะกอน (ศุภมาส, 2557) การใช้กระแสไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียนั้นเป็นเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังสามารถลดค่าความสกปรกในรูปของค่าซีโอดี (COD) และสีได้กว่า 87% และ 93% ตามลำดับ (Cerqueira *et al.*, 2009) ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดที่นิยมนำมาใช้คือขั้วชนิดอลูมิเนียมและขั้วชนิดเหล็ก ซึ่งเมื่อถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าขั้วแต่ละชนิดจะมีการปลดปล่อย  $Al^{3+}$  และ  $Fe^{2+}$  มาตามลำดับ จากงานศึกษาการกำจัดสีย้อมของ Charoenlarp and Choyphan, (2009) พบว่าการใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมให้ผลดีกว่าการใช้ขั้วไฟฟ้าที่เป็นเหล็ก เนื่องจากประสิทธิภาพในการดูดซับของขั้วไฟฟ้าที่เป็นเหล็กจะมีการปลดปล่อย  $Fe^{2+}$  ซึ่งมีประจุบวกในการทำปฏิกิริยาต่ำกว่าการใช้ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมที่มี

การปลดปล่อย  $Al^{3+}$  ทั้งนี้ การติดตามปริมาณ  $Al^{3+}$  และ  $Fe^{2+}$  ที่คงเหลือในน้ำภายหลังการบำบัด (Residual Aluminum/ Iron) จะทำให้สามารถสะท้อนถึงอัตราการใช้กระแสไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการ กระตุ้นแผ่นอิเล็กโทรดได้ด้วย

หากพิจารณากระบวนการเฟนตัน (Fenton Process) ซึ่งหมายถึง การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) ได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH\cdot$ ) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่มีความรุนแรง ทำให้สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ประเภทพอกย้อมได้เป็นอย่างดี หากพิจารณาว่าการใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดเหล็กจากกระบวนการตกตะกอน ด้วยไฟฟ้าที่มีการปลดปล่อยเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และนำมาทำปฏิกิริยาต่อเนื่องด้วยกระบวนการเฟนตัน จะทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการเตรียมตัวตั้งปฏิกิริยาในรูปเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) ลงได้ และเป็น การลดปริมาณเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) ที่อาจหลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งลงได้

ดังนั้นในงานศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงได้เลือกใช้ชนิดของสีย้อมแบบสีรีแอกทีฟมาทำเป็นน้ำเสีย สังกะสีในงานวิจัย เนื่องจากเป็นสีชนิดที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีและมีประจุลบ อีกทั้งยัง ถูกใช้ทั่วไปกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากกว่าสีย้อมชนิดอื่นๆ โดยศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ ตกตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการเฟนตัน มีตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ (1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำเสียเริ่มต้น ปริมาณของกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำ เสียสีแอกทีฟสังเคราะห์โดยการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า (2) ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียเริ่มต้น ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีแอกทีฟ สังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟนตัน และ (3) ค่าใช้จ่ายที่ใช้ต่อการบำบัดน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ทั้งนี้ ข้อมูลที่ได้สามารถเป็นประโยชน์ในการนำไปวางแผนและประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรม พอกย้อมสิ่งทอต่อไป

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

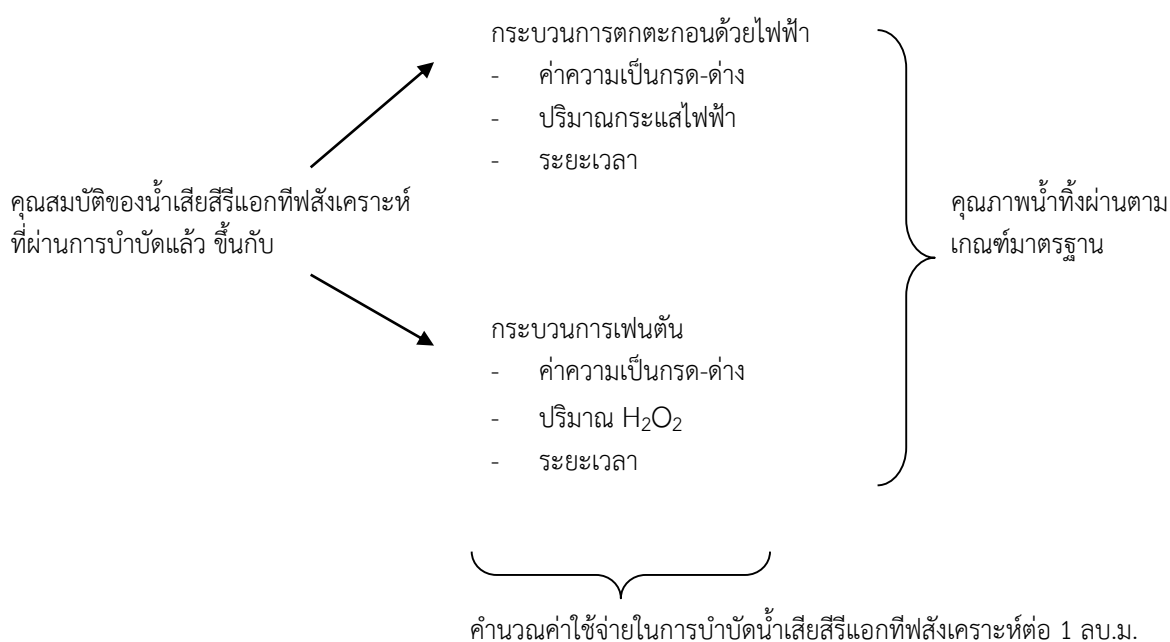
1. เพื่อศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณของกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการทำ ปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีแอกทีฟสังเคราะห์โดยการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า
2. เพื่อหาค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และ ระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีแอกทีฟสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟนตัน
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟสังเคราะห์โดยการตกตะกอน ด้วยกระแสไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการเฟนตัน
4. เพื่อคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟโดยการตกตะกอนด้วย กระแสไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการเฟนตัน

### ขอบเขตของงานวิจัย

1. น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดสีรีแอกทีฟ (Reactive Dye)
2. อิเล็กโทรดที่ใช้ในการศึกษาเป็นชนิดเหล็ก (Iron) และชนิดอลูมิเนียม (Aluminum)
3. รูปแบบการต่อขั้วอิเล็กโทรดเป็นแบบขนาน
4. ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างในชุดการทดลอง 2 ค่า คือ pH 7 และ pH 10
5. ระยะเวลาที่ศึกษา คือ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที

6. ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ศึกษา คือ 2, 4 และ 6 แอมแปร์
7. ความเข้มข้นของ  $H_2O_2$  ที่ใช้ คือ 50, 100, 150, 200 และ 250 mg/L
8. ศึกษาประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ได้แก่ ปริมาณสารอินทรีย์ที่บ่งชี้ในรูปของซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ปริมาณสารอินทรีย์ที่บ่งชี้ในรูปของซีโอดีที่ละลายน้ำ (Soluble Chemical Oxygen Demand, sCOD) ปริมาณของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids, TDS) ค่าความขุ่น (Turbidity) ปริมาณโลหะหนักในรูปตะกั่ว (Pb) และโครเมียม (Cr) และการศึกษาปริมาณอลูมิเนียมและเหล็กไอออนที่คงเหลือในน้ำภายหลังการบำบัด (Residual Aluminum หรือ Residual Iron)

ทั้งนี้ กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย แสดงดังภาพที่ 1-1



ภาพที่ 1-1 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

### ประโยชน์ที่ได้รับ

ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าร่วมกับปฏิกิริยา Fenton ภายใต้เงื่อนไขสภาวะการเดินระบบต่างๆ รวมไปถึงสามารถประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ฟ้างเคราะห์ที่เกิดขึ้น

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### คุณลักษณะของน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีขั้นตอนที่สำคัญคือการเปลี่ยนวัสดุสิ่งทอที่อยู่ในรูปเส้นด้ายหรือผ้าดิบให้กลายเป็นวัสดุที่ขึ้นรูปสามารถนำไปผลิตหรือจำหน่ายในขั้นตอนต่อไปได้ โดยกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นนี้ ต้องมีการใช้วัตถุดิบที่เป็นสารเคมี เช่น สีย้อม สารที่มีฤทธิ์เป็นกรด สารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง สารที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพต่างๆ เช่น สารตกแต่ง สารฟอกขาว เป็นต้น อีกทั้งยังมีการใช้น้ำในกระบวนการผลิตสำหรับอุตสาหกรรมฟอกย้อม (ชนิษฐา, 2550) คุณลักษณะของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมประกอบไปด้วยสารแขวนลอย (Suspended solids) สารอินทรีย์จากกระบวนการย้อม เช่น แป้ง สีย้อม กรดอะซิติก และเส้นใยหรือเส้นด้ายที่ปนเปื้อนออกมาจากกระบวนการผลิต สารอนินทรีย์ประเภทโลหะหนักจากสีย้อมอาทิเช่น ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) โคบอล (Co) สังกะสี (Zn) เป็นต้น โดยน้ำเสียจากการฟอกย้อมมีลักษณะสำคัญคือ มีสีและค่าความเป็นกรด-ด่างที่ค่อนข้างสูง ตัวอย่างของคุณลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอแสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 คุณลักษณะของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ

Wastewater Characteristics	Scouring Process	Bleaching Process	Mercerising Process	Dyeing Process	Composite Process
pH	10-12	8.5-11	8-10	9-11	8-10
TDS (mg/L)	12,000-30,000	2,500-11,000	2,000-2,600	1,500-4,000	5,000-10,000
TSS (mg/L)	1,000-2,000	200-400	100-400	50-350	100-700
BOD (mg/L)	2,500-3,500	100-500	50-120	100-400	50-550
COD (mg/L)	10,000-20,000	1,200-1,600	250-400	400-1,400	250-8,000
Chloride (mg/L)	-	-	350-700	-	100-500
Sulphates (mg/L)	-	-	100-350	-	50-300
Color	-	-	Highly	Strongly	Strongly

ที่มา: Khandegar and Saroha, 2013

จากลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะเห็นว่ามีค่าความสกปรกของน้ำเสียค่อนข้างสูง หากมีการปล่อยน้ำเสียออกสู่แหล่งน้ำภายนอกโดยไม่ทำการบำบัดจนมีคุณลักษณะที่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแหล่งน้ำและสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในแหล่งน้ำอย่างมาก ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวให้มีคุณภาพตามค่ามาตรฐานที่กำหนดก่อนจึงปล่อยออกสู่แหล่งรองรับน้ำทิ้งจึงนับว่ามีความจำเป็นอย่างมาก ในปัจจุบันยังได้มีการประยุกต์ใช้การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) ในการบำบัดน้ำเสียหลายหลากประเภทด้วยเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 การประยุกต์ใช้กระบวนการ Electrocoagulation ในการบำบัดน้ำเสีย

No.	Conditions				Removal Efficiency (%)	References
	Electrode	Current Density	pH	Operating Time		
1	Aluminium alloy	200-400 A/m <sup>2</sup>	4 - 7	5-360 min	Cr(III) 93-99.7%	Elabbas <i>et al.</i> , 2016
					COD 81-95%	
	Pure aluminium	200-400 A/m <sup>2</sup>	4 - 7	5-360 min	Cr(III) 75-99%	
					COD 81-95%	
2	Aluminum	20-85 A/m <sup>2</sup>	5.5	0-80 min	COD 50-81%	Kobyas <i>et al.</i> , 2016
					TOC 42-79%	
					Turbidity 68-96%	
	Iron	20-85 A/m <sup>2</sup>	5.5	0-80 min	COD 47-88%	
					TOC 45-83%	
					Turbidity 75-97%	
3	Mild steel	13.9-138.9 A/m <sup>2</sup>	1.5 - 10.0	30 min	76-99.59%	Nandi and Patel, 2017
4	Iron	8 mA/cm <sup>2</sup>	12	10-60 min	80%	Mahmoud <i>et al.</i> , 2013
5	Aluminum	10-120 A/m <sup>2</sup>	2.5 - 10.0	0-8 min	65-97%	Pajootan <i>et al.</i> , 2012

ตารางที่ 2-2 การประยุกต์ใช้กระบวนการ Electrocoagulation ในการบำบัดน้ำเสีย (ต่อ)

No.	Conditions				Removal Efficiency (%)	References
	Electrode	Current Density	pH	Operating Time		
6	Aluminum	16.33–57.55 mA/cm <sup>2</sup>	6	31.8-88.2 min	Turbidity 58–91%	Mores <i>et al.</i> , 2016
					TP 74–94%	
	Iron	16.33–57.55 mA/cm <sup>2</sup>	7	61.8-118.2 min	Turbidity 55-91%	
					TP 81-97%	
7	Iron	10-30 A/m <sup>2</sup>	2 - 10	0-40 min	Cr(III) 98.97-99.8%.	Zewail and Yousef., 2014
					Cr(VI) 100-98.56%	
8	Aluminum	1.5-11 mA/cm <sup>2</sup>	2 - 8	0-30 min	Cr(II) 60-86%	Shafaei <i>et al.</i> , 2011
9	Aluminum	15mA/cm <sup>2</sup>	4 - 9	0-35 min	Cu <sup>2+</sup> & Zn <sup>2+</sup> 99.5%	Hanay and Hasar, 2011
					Mn <sup>2+</sup> 80-85%	
10	Aluminum	2-16 A/m <sup>2</sup>	2 - 10	0-25 min	Dye 91, 80%	Parsa <i>et al.</i> , 2011
					COD 87, 64%	

## ชนิดของสีย้อม

อุตสาหกรรมการฟอกย้อมสิ่งทอ ได้จำแนกสีย้อมตามวิธีการใช้งานออกเป็น 11 ประเภท โดยที่สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีในการใช้งานที่แตกต่างกันไป (ชนิษฐา, 2550) ดังนี้

1. สีเอซิด (Acid Dye) สีย้อมชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน โยขนแกะไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ

2. สีไดเรกต์ (Direct Dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย ทนแสง

3. สีเบสิก (Basic or Cationic Dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic Base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

4. สีดีสเพอร์ส (Disperse Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง สีดีสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันทันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ สีดีสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มโดยพิจารณาจากเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo Dyes) และสีย้อมอะมิโน แอนทราควิโนน (Amino Anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทราโนลามีน (ethanolamine;  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$ ) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

5. สีรีแอกทีฟ (Reactive Dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นต่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ ไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}$ ) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นต่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง  $70-75^\circ\text{C}$  และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิปกติ สีรีแอกทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

6. สีอะโซอิก (Azoic Dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (Coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโปเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7. สีแว้ต (Vat Dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สี แว้ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว้ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว้ต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีนินดีโก (Indigoid) และสีแอนทราควิโนอยด์ (Anthraquinoid)



8. สีมอร์แดนท์ หรือโครม (Mordant or Chrome Dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วย เพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจาก สีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้ว ละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

9. สีอินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้ ใช้สำหรับย้อมผ้าฝ้าย

10. สีออกซิเดชัน (Oxidation Dye) เป็นสีที่มีละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าฝ้ายและขนสัตว์

11. สีซัลเฟอร์ (Sulfer Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมผ้าฝ้าย สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

### เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ

สำหรับเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอมีหลายวิธี (ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556) ได้แก่

#### 1. กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment Process)

ปกติจะเป็นการกำจัดสารแขวนลอยที่สามารถกำจัดออกได้ด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ เช่น การแยกเศษขยะออกจากน้ำเสียด้วยตะแกรง การตกตะกอนกรวดทรายโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง เพื่อเป็นการลดภาระการทำงานและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของหน่วยบำบัดขั้นต่อไป

#### 2. กระบวนการบำบัดทางฟิสิกส์-เคมี (Physicochemical Process)

กระบวนการบำบัดทางฟิสิกส์-เคมีที่ใช้บำบัดสีในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายเทคโนโลยี ซึ่งระบบที่มีการใช้งานในประเทศไทย ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Coagulation-Flocculation) การดูดซับ (Adsorption) การใช้โอโซน (Ozone Oxidation) และการกรอง (Filtration)

##### 2.1 การสร้างและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation)

การบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนทางเคมีนิยมใช้งานสำหรับการแยกสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กออกจากน้ำเสียโดยใช้สารเคมีในการการตกตะกอน สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียของกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอนิยมใช้ระบบตกตะกอนทางเคมีในการกำจัด สี และสารอินทรีย์ เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็น การบำบัดสารอินทรีย์ก่อนเข้าระบบบำบัดชีวภาพ

Joo *et al.*, (2007) ได้ศึกษาการกำจัดสีด้วยกระบวนการตกตะกอนโดยใช้สาร สารตกตะกอนอนินทรีย์ 2 ชนิด ได้แก่ Alum และ Ferric Salt ร่วมกับสารพอลิเมอร์สังเคราะห์ พบว่า เมื่อใช้สารตกตะกอนอนินทรีย์ (Alum หรือ Ferric Salt) เพียงอย่างเดียวในการกำจัดสี พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้เพียงประมาณ 20% แต่เมื่อมีการเติมสารพอลิเมอร์สังเคราะห์เพิ่มเข้าไป พบว่า Alum/polymer และ Ferric salt/polymer มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเป็น 60% และ 40% ตามลำดับ

Khouni *et al.*, (2011) ศึกษาการกำจัดสีน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้กระบวนการบำบัดสามประเภท ได้แก่ Enzymatic Catalysis, Coagulation-Flocculation และ Nanofiltration Process ซึ่งการใช้กระบวนการ Coagulation-Flocculation ในการกำจัดสีพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ 93% ที่ความยาวคลื่นแสง 593 nm และ 94% ที่ความยาวคลื่นแสง 620 nm ทั้งนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้เพียง 42%

Riera-Torres *et al.*, (2010) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้กระบวนการ Coagulation-Flocculation และ Nanofiltration ร่วมกัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้เกือบ 100% สำหรับสีชนิด RB5 ระบบมีความสามารถในการกำจัดได้ที่ 90% และเมื่อใช้เพียงกระบวนการ Coagulation/Flocculation ในการกำจัดสีพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ที่ 90% เช่นเดียวกัน ดังนั้นการใช้กระบวนการ Coagulation/Flocculation จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการกำจัดสีจากน้ำเสีย

## 2.2 การดูดซับ (Adsorption)

ระบบบำบัดน้ำเสียกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ นิยมใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ในการกำจัดสีที่ไม่สามารถกำจัดในระบบตกตะกอนทางเคมีหรือระบบบำบัดทางชีวภาพ ส่วนใหญ่มักใช้เป็นระบบขั้นสุดท้ายก่อนระบายน้ำทิ้งออกนอกโรงงานอุตสาหกรรม

Zhang *et al.*, (2016) ได้ศึกษาการกำจัดสี 2 ชนิด คือ Cationic Dye ชนิด Malachite Green (MG) และ Anionic Dyes ชนิด Acid Fuchsin (AF) และชนิด Congo Red (CR) ด้วยกระบวนการดูดซับสีโดยใช้ ZnO พบว่ากระบวนการดูดซับสีขึ้นอยู่กับ pH และอุณหภูมิ และสามารถอธิบายกระบวนการดูดซับได้ด้วย Kinetic Model และ Langmuir Isotherm Model ทั้งนี้ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ MG, AF และ CR คือ 2,963 mg/g, 3,307 mg/g และ 1,554 mg/g ตามลำดับ

Zhang *et al.*, (2015) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับสีออกจากสารละลายชนิด Methylene Blue ทำการบำบัดโดยใช้ผง Pyrophyllite ที่ขนาด 21.42  $\mu\text{m}$ , 7.18  $\mu\text{m}$  และ 5.55  $\mu\text{m}$  ในการดูดซับสี พบว่าการดูดซับสีขึ้นกับค่า pH ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของ Methylene Blue โดยความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของ Methylene Blue และ pH ในสารละลายเพิ่มขึ้น และการดูดซับจะเพิ่มขึ้นหากปริมาณของตัวดูดซับและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับเมื่อใช้ผง Pyrophyllite ที่ขนาด 21.42  $\mu\text{m}$ , 7.18  $\mu\text{m}$  และ 5.55  $\mu\text{m}$  เพิ่มขึ้นจาก 3.71 mg/g เป็น 3.83 mg/g, 3.94 mg/g และ 4.24 mg/g ตามลำดับ

Mahmoodi *et al.*, (2011) ศึกษาความสามารถของถ่าน Activated Carbon (AC) ในการดูดซับสี Anionic Dyes 2 ชนิด คือ Direct Blue 78 (DB78) และ Direct Red 31 (DR31) จากน้ำเสียด้วยระบบ Single และ Binary System โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือปริมาณของถ่าน AC ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Anionic Dyes และเกลือของ Anionic Dyes ซึ่งความสามารถในการดูดซับของ DB78 และ DR31 เท่ากับ 76.92 mg/g และ 111 mg/g ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับสำหรับ Single System มีค่าเท่ากับ 76.92 mg/g ส่วนระบบ Binary System มีค่าเท่ากับ 125 mg/g ตามลำดับ

### 2.3 การใช้โอโซน (Ozone Oxidation)

โอโซน (O<sub>3</sub>) นับว่าเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง จึงนิยมนำมาใช้ในการย่อยสลายสีและสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งสิ่งทอ

Cardoso et al., (2016) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยกระบวนการ Ozonation, Photolysis, Photocatalysis และ Photoelectrocatalysis พบว่าเมื่อใช้วิธี Photolysis, Photocatalysis และ Photoelectrocatalysis โดยไม่มีโอโซนร่วมด้วยที่ pH เท่ากับ 3 และ pH เท่ากับ 8 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ประมาณ 50% ที่เวลา 60 นาที และเมื่อใช้ Photolysis, Photocatalysis และ Photoelectrocatalysis โดยมีโอโซนร่วมทำปฏิกิริยาด้วยที่ pH เท่ากับ 3 และ pH เท่ากับ 8 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเป็น 90% ที่เวลา 15 นาที

Somensi et al., (2010) ศึกษาการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีและค่า COD ที่ค่า pH เท่ากับ 9.1 และ pH เท่ากับ 3 หลังจากทำการบำบัดด้วยโอโซนนาน 4 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยในการกำจัดสีมีค่าเท่ากับ 67.5% ที่ค่า pH 9.1 และ 40.6% ที่ค่า pH 3 ในขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD มีค่าเท่ากับ 25.5% ที่ pH 9.1 และ 18.7% ที่ pH 3 โดยมีอัตราการผลิตโอโซนที่ 20 g/h

### 2.4 การกรอง (Filtration)

ถังกรองทรายที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งสิ่งทอ มักใช้เป็นหน่วยบำบัดขั้นสุดท้ายก่อนระบายน้ำทิ้ง โดยถังกรองทรายทำหน้าที่กรองสารแขวนลอยหรือตะกอนเบาที่หลุดออกมาจากระบบบำบัดก่อนหน้า

Jager et al., (2014) ได้ศึกษาหาวิธีการบำบัดที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ยากต่อการสลายตัวและสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นพิษในระบบบำบัดน้ำเสียสิ่งสิ่งทอด้วยการใช้ Dual-Stage Membrane Bioreactor (dsMBR) กับระบบ Reverse Osmosis น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมีค่าสีอยู่ในช่วง 195–2,070 ADMI และมีค่า COD อยู่ระหว่าง 728 และ 1,033 mg/L ผลจากการบำบัดน้ำเสียพบว่าสามารถกำจัดแอมโมเนีย ฟอสเฟต ไนเตรต และ TOC ได้ประมาณ 80% และสามารถกำจัดสีเข้มได้ที่ 99.1% สำหรับสีอ่อน 90.4% ส่วนสีกลางๆ มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้เท่ากับ 54.9%

Amini et al., (2011) ศึกษาความสามารถของระบบ Acrylic Grafted Nanomembrane เพื่อกำจัดสีออกจากน้ำเสียประเภทสิ่งสิ่งทอ พบว่าระบบนี้สามารถลดความเข้มข้นของสีลงไปได้ 86.0-99.9% และมีค่าการซึมผ่านได้ (Hydraulic Permeability) ที่ 7.6 L/ m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup>.bar<sup>-1</sup>

Katukiza et al., (2014) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มาจากห้องน้ำ การซักล้าง และห้องครัวของบ้านเรือนจำนวน 10 หลังคาเรือน ทำการบำบัดด้วยหินภูเขาไฟ โดยจะใช้ท่อพีวีซีจำนวน 2 ท่อ ท่อที่ 1 ทำการใส่หินภูเขาไฟลงไปที่ความสูง 60 cm ท่อที่ 2 ทำการใส่หินภูเขาไฟลงไปที่ความสูง 30 cm พร้อมใส่ทรายและถ่าน Activated carbon หนา 30 cm จากการศึกษาพบว่าท่อที่ 1 และ 2 มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้ 90% และ 84% ที่ HLR 20 cm/day และ 40 cm/day ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการกำจัด TOC

และ DOC ได้ 77% และ 71% ตามลำดับ ที่ HLR 20 cm/day, แต่จะลดลงเป็น 72% และ 67% ตามลำดับ ที่ HLR 40 cm/day

### 3. กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment Process)

ประเภทระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสีสิ่งทอมี 3 ประเภท ได้แก่ ระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Treatment process) นิยมใช้ระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge) และบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment process) นิยมใช้งานระบบบ่อไร้ออกซิเจน (Anaerobic Ponds) และระบบ บ่อปรับเสถียร (Stabilization pond) ที่เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบกลไกทางธรรมชาติ

### เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสี

สีที่มีปริมาณมากและตกค้างในน้ำเสียจากการฟอกย้อมสีสิ่งทอ สามารถกำจัดได้ด้วยวิธีต่างๆ (วนิดา, 2555) ดังนี้

#### 1. กระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation)

การกำจัดสีในน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานฟอกย้อมสีสิ่งทอ โดยวิธีการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) ทำโดยการปรับสภาพค่าความเป็นกรด-ด่าง เพื่อหาช่วงค่าที่เหมาะสมในการเดินระบบ โดยสารที่นิยมใช้เป็นสารเคมีสร้างตะกอน (Coagulant) คือ สารส้ม (Aluminium Sulfate; Alum) ปูนขาว (Calcium oxide) และเหล็กในรูปแบบเฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4$ ) หรือเฟอร์ริคคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) เนื่องจากหากโมเลกุลของสีในน้ำเสียมีขนาดเล็กและละลายน้ำได้ดี การเกิดตะกอนของสีจะไม่สามารถทำได้เท่าที่ควร ทำให้ต้องมีวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพของการรวมตะกอนให้ดีขึ้น เช่น การใช้สารช่วยในการสร้างและรวมตัวของตะกอน ชนิดของสารเคมีที่ใช้คือโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ซึ่งการกำจัดสีโดยการสร้างและรวมตะกอนเป็นการทำให้ตะกอนหรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก (Colloid) มีโอกาสรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่าฟล็อก (Floc) และสามารถตกตะกอนได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากอนุภาคของสารแขวนลอยมีประจุไฟฟ้าลบเป็นส่วนใหญ่ เมื่ออนุภาคเหล่านั้นมาพบกันก็จะผลักรันไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นการทำลายประจุของอนุภาคหรือทำให้อนุภาคเป็นกลางโดยการเติมสารเคมีสร้างตะกอนจึงมีความจำเป็น การใช้งานส่วนใหญ่มักใช้สารส้มในการสร้างตะกอน ส่วนสารประกอบเหล็กในรูปแบบต่างๆ ไม่ค่อยได้รับความนิยม เนื่องจากมีราคาแพงกว่าสารส้ม และก่อให้เกิดสีในทิ้งภายหลังการบำบัด

#### 2. กระบวนการเฟนตัน (Fenton process)

กระบวนการเฟนตัน คือ การออกซิเดชันขั้นสูงโดยใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนและไดไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^{\cdot}$ ) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ไอออนบวกของเหล็กทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ( $OH^{\cdot}$ ) ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาเป็นตัวกลางสำคัญ ซึ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่ได้มีค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันสูงและแสดงถึงความสามารถในการรับอิเล็กตรอน ถ้าเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงจะสามารถรับอิเล็กตรอนได้ง่าย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากจนเปลี่ยนสภาพเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ทั้งนี้พบว่ากระบวนการเฟนตันมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีของโรงงานย้อมสีสิ่งทอ ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน ได้แก่ ความเข้มข้นของไอออนเหล็ก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิ ความเป็นกรดต่าง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

### 3. กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน (Ozone Oxidation)

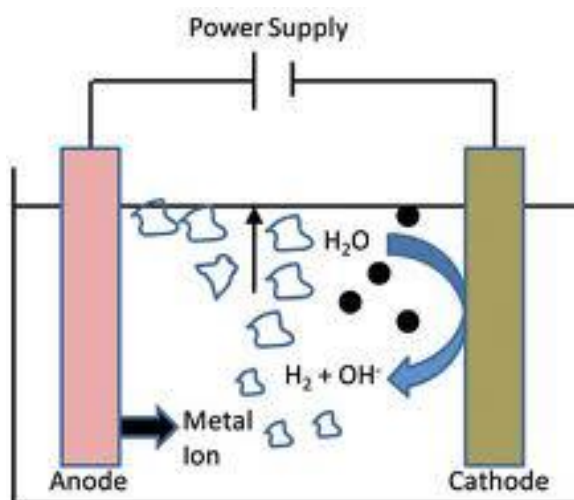
การกำจัดสีด้วยโอโซนทำให้พันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสี (Chromophores) แตกออกกลายเป็นโมเลกุลเล็กและสีสามารถหายไปโดยสามารถแยกสลายโมเลกุลของสีที่มีความยาวมากให้มีขนาดสั้นลงและทำให้สีของน้ำเสียลดลง ทั้งนี้โอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงมีประสิทธิภาพสูงในการทำลายอนุภาคสีในน้ำได้ประมาณ 20 เท่าเมื่อเทียบกับการละลายในน้ำของออกซิเจน สามารถกำจัดสีที่แท้จริง (True Color) โดยการทำลายโครงสร้างของโมเลกุลชนิดโครงสร้างแบบโซ่ของสารอินทรีย์ โดยความสามารถในการกำจัดสีมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกับโอโซนนานขึ้น และอนุภาคของสีในน้ำจะลดลงมากที่สุดเมื่อผ่านน้ำเสียเข้าระบบเป็นเวลา 60 นาที ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนออกซิเดชันในการกำจัดสีโดยความเป็นกรดต่างเท่ากับ 12 เป็นสภาวะที่สามารถกำจัดสีด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชันได้ดีที่สุด ซึ่งก๊าซโอโซนไม่เสถียรสามารถสลายตัวกลายเป็นออกซิเจนได้ง่าย ทำให้ต้องผลิตขึ้นมาใช้ ณ สถานที่ใช้งานเลย หรือเรียกว่าระบบแบบติดอยู่กับที่ (Generated On-Site) วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซนคืออากาศหรือออกซิเจน โดยออกซิเจน 2 โมเลกุลจะผลิตก๊าซโอโซนได้ 1 โมเลกุล ดังสมการที่ (2-1) และ (2-2) การผลิตก๊าซโอโซนโดยอากาศด้วยเครื่องผลิตโอโซนจะได้ก๊าซโอโซนประมาณร้อยละ 0.5 ถึง 3 ในขณะที่การผลิตก๊าซโอโซนโดยใช้ออกซิเจนจะได้ก๊าซโอโซนประมาณร้อยละ 1 ถึง 6 การผลิตโอโซนจะอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีในการเปลี่ยนออกซิเจนเป็นก๊าซโอโซน โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีบางชนิดที่เป็นสารให้ออกซิเจน หรือปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีโดยป้อนออกซิเจนเข้าไปในห้องปฏิกิริยาที่มีขั้วประจุไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงมาก แล้วทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลของออกซิเจนเป็นอนุมูลออกซิเจนอิสระและไปรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจนเป็นก๊าซโอโซน ทั้งนี้การผลิตโอโซนด้วยวิธีปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นที่แพร่หลายมากกว่า



### 4. การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation Process)

การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation Process) เป็นกระบวนการที่ใช้บำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารเคมีทั้งที่ละลายและไม่ละลายน้ำ โดยอาศัยการทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอย (หรืออิมัลชัน) หรือสารปนเปื้อนที่มีน้ำเป็นตัวกลาง หลักการทำงานคือการให้กระแสไฟฟ้ตกคร่อมบนขั้วไฟฟ้า ทำให้ขั้วไฟฟ้าชนิดแอโนดละลายออกมาเป็นไอออน ซึ่งทำให้เกิดประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคหรือไอออนที่อยู่ในน้ำ และเกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้น จนทำให้สามารถแยกออกจากน้ำได้ด้วยวิธีการตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนด้วยตนเอง

เซลล์ที่ใช้ตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบง่ายที่ประกอบด้วยขั้วแอโนดและขั้วแคโทด แสดงดังภาพที่ 2-1 ขั้วทั้งสองอาจเป็นโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โดยส่วนมากจะใช้ขั้วชนิดอลูมิเนียม (Al) และขั้วชนิดเหล็ก (Fe) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งภายนอกจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีและเกิดไอออนของอลูมิเนียม ( $\text{Al}^{3+}$ ) หรือไอออนของเหล็ก ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ขึ้นที่ขั้วแอโนด ไอออนเหล่านี้จะทำลายเสถียรภาพของอนุภาคต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ กระบวนการนี้สอดคล้องกับการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการสร้างและรวมตกตะกอนทางเคมีแบบดั้งเดิม ที่มีการใช้สารสร้างตะกอน (Coagulant) เป็นเกลือของอลูมิเนียมหรือเหล็กนั่นเอง (ศุภมาศ, 2557)



ภาพที่ 2-1 กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย  
ที่มา: Chaudhary and Sahu, 2013

การกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำโดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าพบว่ากลไกการกำจัดสีย้อมเกิดได้ 2 แบบ คือ การตกตะกอน และการดูดซับบนผิวของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ขึ้นกับค่า pH ของตัวกลาง แสดงดังสมการที่ 2-3 ถึง 2-5

#### การตกตะกอน



#### การดูดซับ



ในระหว่างกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า โมเลกุลสีย้อมที่มีประจุลบจะถูกทำให้เป็นกลาง ส่วนกลุ่มอนุภาคที่เกาะรวมตัวกันที่มีประจุบวกเกิดขึ้นจากการดูดซับของสีย้อมในรูปที่เป็นทั้งโมโนเมอร์และโพลิเมอร์

กรณีการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมด้วยวิธีทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์มาสลายสีย้อม มีข้อดีคือมีค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนในการดำเนินงานต่ำและการเดินระบบบำบัดน้ำเสียไม่ซับซ้อน แต่มีข้อด้อยคือไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดน้ำปนเปื้อนสีย้อมได้ทุกแบบ เนื่องจากสีย้อมเป็นสารเคมีที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์จึงไม่สามารถใช้ได้ในระยะยาว ดังนั้น การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าจึงเป็นวิธีที่มีศักยภาพสูงที่จะใช้บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม ทั้งนี้ ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียขึ้นกับค่า pH ความเข้มข้นของสีย้อมที่ปนเปื้อน ปริมาณกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ ชนิดและพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด เป็นต้น

การตกตะกอนด้วยไฟฟ้านี้สามารถกำจัดสีย้อมในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังใช้เวลาบำบัดสั้นมาก ประมาณ 3-5 นาที ที่อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 2.24 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร นอกจากนั้นยังพบว่าการกำจัดอนุภาคสีย้อมที่เกาะรวมกันได้ง่ายเนื่องจากการลอยของตะกอนด้วยฟองแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า อีกทั้งไอออนของขั้วโลหะที่หลุดมายังทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนที่ขั้วแคโทดเกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ และมีสมบัติในการดูดตกตะกอนสารแขวนลอยและคอลลอยด์ในน้ำได้ดีอีกด้วย

### ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (ศุภมาส, 2557)

1. เมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า

เมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทด จะทำให้ขั้วแอโนดมีไอออนของเหล็ก ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ละลายออกมาในน้ำ โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการที่ 2-6



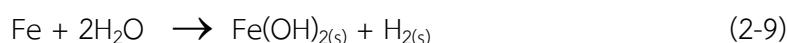
และที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้เป็นไอออนของไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) และแก๊สไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ดังสมการที่ 2-7



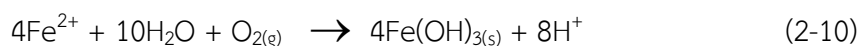
เนื่องจากที่ขั้วแคโทดเกิด  $\text{OH}^-$  ขึ้น ทำให้น้ำเสียค่อยๆ มีค่าความเป็นด่างเพิ่มมากขึ้น หรือ  $\text{OH}^-$  บางส่วนรวมตัวกับ  $\text{Fe}^{2+}$  ในน้ำเกิดเป็น  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  และกลายเป็นตะกอนที่ไม่ละลายน้ำ ดังสมการที่ 2-8



โดยเขียนปฏิกิริยารวมจากสมการที่ 2-6 ถึง 2-8 ได้เป็น



ถ้าระหว่างการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว มี  $\text{O}_2$  อยู่ด้วย  $\text{Fe}^{2+}$  จะถูกออกซิไดซ์ได้เป็น  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ที่ไม่ละลายน้ำ เขียนเป็นปฏิกิริยาได้เป็น



และ  $\text{H}^+$  ที่เกิด ก็จะถูกรีดิวซ์ให้เป็น  $\text{H}_2$  ที่ขั้วแคโทด



ดังนั้น ปฏิกิริยารวมที่ประกอบด้วยปฏิกิริยา (10) และ (11) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



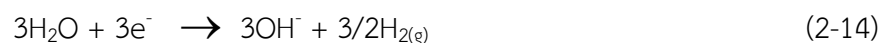
ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า จะเกิด  $\text{Fe(OH)}_2$  เป็นตะกอนปะปนกับ  $\text{Fe(OH)}_3$  ซึ่งกรองแยกออกมาจากน้ำเสียได้ ตะกอนเหล่านี้ยังปะปนกับไอออนของเหล็กและสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กกับไอออนไฮดรอกไซด์ในรูปต่าง ๆ ได้แก่  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe(OH)}^{2+}$ ,  $\text{Fe(OH)}_2^{2+}$ ,  $\text{Fe(OH)}_3$  และ  $\text{Fe(OH)}_4^-$  โดยขึ้นกับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (pH) เช่น หากค่า pH อยู่ระหว่าง 3-7 ไอออนของเหล็กไฮดรอกไซด์จะเกิดการสร้างตัวเป็นโครงข่ายคล้ายกับโพลิเมอร์ไรซ์ของ  $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$  และ  $\text{Fe}_2(\text{OH})_4^{2+}$  เป็นต้น โดยทั้งโครงข่ายแบบโพลิเมอร์ และไอออนของเหล็กในรูปต่าง ๆ มีสมบัติในการดูดซับและจับเกาะสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำได้ดี ซึ่งเป็นอีกปัจจัยที่ทำให้เกิดการดูดซับและเกาะรวมตัวเป็นอนุภาคก้อนโตมากขึ้นและแยกออกได้ง่ายขึ้นนั่นเอง

## 2. เมื่อใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า

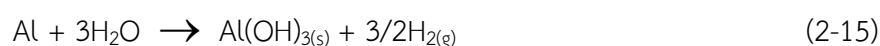
ในกรณีที่ใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า จะมีการละลายไอออนของอลูมิเนียม ( $\text{Al}^{3+}$ ) เช่นเดียวกับการใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ดังสมการที่ 2-13



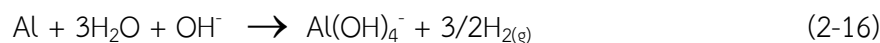
และปฏิกิริยาที่แคโทดจะให้  $\text{OH}^-$  และแก๊ส  $\text{H}_2$  ดังสมการที่ 2-14



เมื่อ  $\text{Al}^{3+}$  ละลายออกมาในน้ำบางส่วนรวมตัวกับ  $\text{OH}^-$  เป็นโมโนเมอร์ของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ปะปนในน้ำ เช่น  $\text{Al(OH)}^{2+}$ ,  $\text{Al(OH)}_2^+$ ,  $\text{Al(OH)}_3$  และ  $\text{Al(OH)}_4^-$  โดยขึ้นกับค่า pH ของตัวกลาง ในตัวกลางที่มีค่า pH เป็นด่างจะพบโมโนเมอร์ที่มีประจุบวกมาก โมโนเมอร์ดังกล่าวสามารถเกิดโพลิเมอร์ไรซ์เป็น  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ,  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ ,  $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$ ,  $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$ ,  $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$  และ  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$  ได้ บางส่วนจะอยู่ในรูปโมโนเมอร์ และในที่สุดจะกลายเป็น  $\text{Al(OH)}_3$  ที่ไม่ละลายน้ำดังสมการที่ 2-15



ขณะที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมจะค่อยๆ ละลายไป ส่วน  $\text{OH}^-$  ที่เกิดขึ้นซึ่งมีสมบัติเป็นด่างจะกัดเซาะที่ขั้วไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยาให้แก๊ส  $\text{H}_2$  ขึ้น ดังสมการที่ 2-16



ส่วนการใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า  $\text{OH}^-$  ที่เกิดขึ้นจะไม่กัดเซาะขั้วไฟฟ้าและเกิดเป็น  $\text{Fe(OH)}_4^-$  ดังเช่นที่เกิดขึ้นเมื่อใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ดังนั้น การใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าจะคงทนมากกว่าการใช้อลูมิเนียม อย่างไรก็ตามการใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าก็มีข้อดีที่มีการเกิดโพลิเมอร์ไรซ์ และเกิดเป็นอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีประจุหลากหลายรูปแบบซึ่งมีสมบัติในการดูดซับดี ดังนั้นการเลือกชนิดของขั้วไฟฟ้าจึงต้องพิจารณาถึงข้อดีข้อด้อยของวัสดุขั้วไฟฟ้างดกล่าว อีกทั้งชนิดของสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำก็ให้ผลแตกต่างกันอีกด้วย



Koby et al., (2003) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้เหล็กและอลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด ในสถานะที่เป็นกรดที่ pH มีค่าน้อยกว่า 6 กรณีใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรดพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด COD และความขุ่นมีมากกว่าการใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด แต่ในสถานะที่เป็นกลางและด่างการใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรดจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัด COD และความขุ่นที่เท่ากันพบว่าขั้วเหล็กต้องใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 80-100 A/m<sup>2</sup> ส่วนขั้วอลูมิเนียมต้องใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 150 A/m<sup>2</sup> ที่ระยะเวลาการทดลอง 10 นาที

Koby and Demirbas. (2015) ทำการบำบัดน้ำเสียสีย้อม Real Dyehouse ด้วยกระบวนการ Continuous Flow Electrocoagulation (CEC) พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD, TOC และ Turbidity มีค่าเท่ากับ 85%, 76% และ 95% เมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด และ 77%, 72% และ 95% เมื่อใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 65 A/m<sup>2</sup> อัตราการไหลเข้า 0.01 L/min ระยะเวลา 80 นาที มีค่า Operating Costs ของเหล็ก คือ 1.562 \$/m<sup>3</sup> หรือ 7.282 \$/kg COD และสำหรับอลูมิเนียมมีค่า Operating Costs เท่ากับ 1.851 \$/m<sup>3</sup> หรือ 14.257 \$/kg COD

### ข้อดี-ข้อด้อยของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

ข้อดีและข้อด้อยแสดงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ข้อดีและข้อด้อยของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

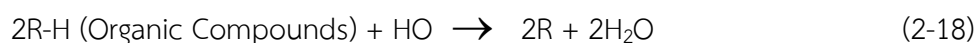
ข้อดี	ข้อด้อย
<ul style="list-style-type: none"> <li>● มีประสิทธิภาพในการแยกสารปนเปื้อนสูงกว่าการตกตะกอนด้วยสารเคมี</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ขั้วแอโนดจะค่อย ๆ ถูกกัดกร่อน และสูญเสียเนื้อไปอย่างต่อเนื่อง และอาจเกิดคราบ หรือฟิล์มบางเคลือบผิวขั้วไฟฟ้า ทำให้ประสิทธิภาพลดลง</li> <li>● หากไอออนของอลูมิเนียม (หรือเหล็ก) ที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้ามีความเข้มข้นสูงมาก อาจต้องกำจัดก่อนปล่อยทิ้ง</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● ไม่จำเป็นต้องควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสีย ยกเว้น น้ำเสียที่รุนแรง</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>● ใช้สารเคมีน้อยมาก</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>● เกิดตะกอนน้อยกว่าการตกตะกอนด้วยวิธีเคมี</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>● ต้นทุนการดำเนินการต่ำกว่าวิธีดั้งเดิมแบบอื่น</li> </ul>	

ที่มา: ศุภมาส (2557)

## กระบวนการเฟนตัน

กระบวนการเฟนตันเป็นวิธีการหนึ่งของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (Advanced Oxidation Processes, AOPs) ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี โดยเป็นการเติมสารอินทรีย์ลงไปให้เกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, HO<sup>•</sup>) ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ทั้งนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) และเฟอร์รัสไอออน (Fe<sup>2+</sup>) จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่มีลักษณะเฉพาะและสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลของสารเคมีที่เป็นพิษได้โดยมีออกซิเดชันระหว่างเฟอร์รัสไอออนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กระบวนการนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารพิษประเภทสารประกอบอินทรีย์ปะปน เช่น ฟีนอล สารประกอบอะโรมาติก หรือ สารเคมีที่มาจากวัสดุสีย้อม ยาฆ่าแมลง สารกันบูด พลาสติก ยาง เป็นต้น กระบวนการเฟนตันที่ประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสีย สามารถช่วยลดค่า BOD COD กลิ่น สี รวมทั้งช่วยในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ และทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ (พัชรินทร์, 2557)

ปฏิกิริยาเฟนตันเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) และเฟอร์รัสไอออน (Fe<sup>2+</sup>) โดยจะเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, HO) ดังสมการที่ 2-17 และ 2-18



จากสมการที่ 2-17 กรณีที่ในน้ำมีสารประกอบของสารอินทรีย์จะส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดังแสดงในสมการที่ 2-18 ทั้งนี้การย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทำให้สารอินทรีย์มีขนาดที่เล็กลงและความเป็นพิษในน้ำเสียก็จะลดลง จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจะส่งผลให้เฟอร์ริกไอออน (Fe<sup>3+</sup>) ในน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น และเฟอร์รัสไอออน (Fe<sup>2+</sup>) ลดลงจนหมด ส่งผลให้ปฏิกิริยาลิ้นสุดลง แต่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้อีกและเกิดอย่างต่อเนื่องเมื่อปฏิกิริยาได้รับการกระตุ้นจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตซึ่งเป็นส่วนประกอบของแสงอาทิตย์ ดังนั้นเมื่อมีแสงอาทิตย์ส่องไปยังปฏิกิริยาเฟนตันจะทำให้เกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของน้ำเสียในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) และเฟอร์รัสไอออน (Fe<sup>2+</sup>) ทั้งนี้หากมีการประยุกต์ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ในกระบวนการเฟนตันจะทำให้กระบวนการเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องใช้สารเคมีเพิ่มเติม ส่งผลให้ต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียลดลง รวมทั้งกระบวนการดังกล่าวยังเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วย (พัชรินทร์, 2557)

Farshid and Mahsa, (2015) ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีจากน้ำเสียจริงของอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยการใช้ Electrocoagulation, Electrochemical Fenton, Electrocoagulation-Fenton และ Peroxi-Coagulation ในการทดลองมีการใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วอิเล็กโทรด ทำการทดลองที่ค่า pH เท่ากับ 3 และ 6.5 ผลการศึกษาพบว่า ที่ pH เท่ากับ 3 เป็นค่าที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเฟนตัน สำหรับการใช้ Electrocoagulation-Fenton พบว่าที่ระยะเวลา 40 นาทีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา มีการใช้ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 500 mg/L กระแสไฟฟ้า 200mA ค่า pH เท่ากับ 3 ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ถึง 94.4 % ในขณะที่ค่า pH เท่ากับ 6.5 ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ลดลงเหลือ 75.3% แต่หากมีการเพิ่มความเข้มข้นของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> การกำจัดสีก็จะมีประสิทธิภาพดีขึ้นในระยะเวลาที่รวดเร็วขึ้นด้วย

สุเทพ และ วีระนุช (2553) ได้ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยกระบวนการเฟนตัน และกระบวนการสร้างตะกอนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตันคือการใช้ปริมาณเปอร์ซัลเฟตที่ 0.92 g/L ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 6.38 g/L ที่ค่า pH เท่ากับ 3.4 และระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 150 นาที โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และค่า COD โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 97.85%, 52.83% และ 79.98% ตามลำดับ เมื่อใช้ลูมิเนียมซัลเฟตที่ปริมาณสารสร้างตะกอนเท่ากับ 2.56 g/L และค่า pH ที่ 7.20 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และ COD โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 94.02%, 76.28% และ 42.96% ตามลำดับ เมื่อใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์โดยใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ 4.0 g/L ที่ค่า pH เท่ากับ 7.40 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และ COD โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 96.12%, 86.75% และ 54.18% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของสารเคมีทั้ง 3 ชนิด พบว่ากระบวนการเฟนตันให้ประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีกว่า

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### การเตรียมน้ำสังเคราะห์

ก่อนการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จะมีการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมจริงที่ได้ทำการเก็บตัวอย่างมา น้ำเสียสังเคราะห์นี้จะถูกเตรียมขึ้นให้มีลักษณะคล้ายน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมจริง ซึ่งจะมีค่า BOD COD สี ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำเสียสังเคราะห์คล้ายน้ำเสียจริง โดยน้ำเสียสังเคราะห์จะใช้ส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

1. Reactive Blue Dye (as coloring agent)
2. Starch (as sizing agent)
3.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (as fixing agent)
4.  $\text{NaHCO}_3$  (as fixing agent)
5.  $\text{NaCl}$  (as fixing agent)
6.  $\text{NaOH}$  (for hydrolysis)
7.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (as pH neutralization)
8.  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (represent as heavy metal in wastewater)
9.  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$  (represent as heavy metal in wastewater)
10.  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  (represent as heavy metal in wastewater)

#### การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

1. ติดตั้งแผ่นอิเล็กโทรดจำนวน 4 แผ่น ในถังรีแอกเตอร์ แล้วเชื่อมต่อสายไฟฟ้ากับเครื่อง DC Power โดยเชื่อมต่อแบบขนาน เปิดเครื่อง DC Power โดยเครื่องนั้นต้องยังไม่มีค่ากระแสไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าใดๆ

2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้ โดยปรับ pH เป็น 7 ลงในถังรีแอกเตอร์ขนาด  $17 \times 32 \times 28 \text{ cm}^3$  ปริมาตร 9 L จากนั้นทำการกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก

3. หมุนปรับปุ่มค่าศักย์ไฟฟ้าไปจนสุด จากนั้นจึงหมุนปรับปุ่มค่ากระแสไฟฟ้าที่ 2 แอมแปร์ แล้วจึงเริ่มจับเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

4. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำปริมาตรประมาณ 80 มล. ที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที แล้วจึงหยุดการปล่อยกระแสไฟฟ้า ตัวอย่างที่ทำการเก็บมานั้นจะตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงนำไปตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามตารางที่ 3-1 ต่อไป

5. ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 1-4 โดยทำการเปลี่ยนค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 7 หรือ 10 และเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 2, 4 หรือ 6 แอมแปร์

#### การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการเฟนตัน

1. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 mL ปริมาตร 500 mL จำนวน 6 บีกเกอร์ พร้อมทั้งเติม  $\text{Fe}$  ด้วยความเข้มข้นที่เหมาะสมในทุกบีกเกอร์

2. ติดตั้งอุปกรณ์จาร์เทส เปิดเครื่องทำการกวนเร็วที่ 2,000 RPM เป็นเวลา 2 นาที โดยเมื่อกวนถึง 1 นาที จึงทำการเติม  $\text{H}_2\text{O}_2$  เข้มข้น 0, 50, 100, 150, 200 และ 250 mg/L ในบีกเกอร์ที่ 1-6 ตามลำดับ กวน

ต่อไปอีก 1 นาที แล้วทำการกวนซ้ำที่ 40 RPM เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้ตะกอนเกิดการรวมตัวกันมากขึ้น แล้วจึงทิ้งให้ตกตะกอนอีก 30 นาที

3. เก็บตัวอย่างน้ำส่วนใสไปตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ตามตารางที่ 3-1 ต่อไป

### การบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าตามด้วยเฟนตัน

1. ทำการทดลองในขั้นตอนที่ 1-4 เช่นเดียวกับกับการบำบัดโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยกำหนดค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสีย ค่ากระแสไฟฟ้า และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมซึ่งได้มาจากผลการทดลองการบำบัดโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

2. เมื่อทำการบำบัดด้วยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแล้วจึงทำการเก็บน้ำส่วนใสมาบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน โดยเติม  $H_2O_2$  ด้วยความเข้มข้นต่างๆ ด้วยการใช้อาร์เทส

3. เมื่อทำการบำบัดเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงทำการเก็บตัวอย่างน้ำส่วนใสไปตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ ตามตารางที่ 3-1 เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย และประเมินค่าใช้จ่ายต่อไป

ตารางที่ 3-1 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด

พารามิเตอร์	วิธีการตรวจวัด
pH	pH meter
Color	Spectrophotometric Method
sCOD	Soluble Closed Refluxed Method
COD	Closed Refluxed Method
TDS	Gravimetric Method
Turbidity	Turbidity Meter
Conductivity	Conductivity Meter
Residual Aluminum	Eriochrome Cyanine R
Residual Total Iron	Phenanthroline Method
Heavy Metal (Pb and Cr)	Atomic Absorption Spectrophotometer

### การวิเคราะห์หาต้นทุนการดำเนินการ

ในการเลือกใช้การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการใดๆก็ตามต้องมีการคำนึงถึงต้นทุนที่เหมาะสมในการเลือกใช้วิธีการนั้นๆ สำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้านั้น ก็มีปัจจัยที่ถูกนำมาใช้ในการหาต้นทุนการดำเนินการ เช่น วัสดุที่ใช้ (ชนิดขั้วอิเล็กโทรด) พลังงานที่ต้องใช้ ฯลฯ และในการศึกษาครั้งนี้ จะหาต้นทุนในการดำเนินการที่เหมาะสมเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโทรดอลูมิเนียมและเหล็ก โดยใช้วิธีตาม Kobya and Demirbas (2015) โดยมีตัวแปร 2 พารามิเตอร์ที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ พลังงานที่ถูกใช้ไป (Amount of Energy Consumption) และ ปริมาณของอิเล็กโทรดที่ถูกใช้ไป (Amount of Electrode Material Used) ดังสมการที่ (19) โดยมีหน่วยเป็น บาท/ $m^3$  แสดงดังสมการที่ 3-1

$$OC = (\alpha \times C_{\text{energy}}) + (\beta \times C_{\text{electrode}}) \quad (3-1)$$

โดยที่  $C_{\text{energy}}$  (kWh/m<sup>3</sup>) คือ ปริมาณของพลังงานที่ถูกใช้ไป  
 $C_{\text{electrode}}$  (kg/m<sup>3</sup>) คือ ปริมาณอิเล็กโทรดที่ถูกใช้ไป  
 $\alpha$  คือ electrical energy price (บาท/kWh)  
 $\beta$  คือ electrode price (บาท/kg)

ซึ่งปริมาณพลังงาน (energy consumption) และปริมาณอิเล็กโทรด (electrode consumptions) หาได้จากสมการที่ (3-2) และ (3-3) ตามลำดับ

$$C_{\text{energy}} = \frac{U \times i \times t_{\text{EC}}}{v} \quad (3-2)$$

$$C_{\text{electrode}} = \frac{i \times t_{\text{EC}} \times M_w}{z \times F \times v} \quad (3-3)$$

Charge density (q) หาได้จากสมการที่ 3-4

$$q \text{ (C/L)} = \frac{i \times t_{\text{EC}}}{v} \quad \text{or} \quad q \text{ (F/m}^3\text{)} = \frac{i \times t_{\text{EC}}}{F \times v} \quad (3-4)$$

โดยที่  $U$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า

$i$  คือ กระแสไฟฟ้า (A)

$t_{\text{EC}}$  คือ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (วินาทีหรือชั่วโมง)

$v$  คือ ปริมาณของ CMW ใน EC reactor (m<sup>3</sup>)

$M_w$  คือ มวลโมเลกุลของ Al หรือ Fe electrode (26.98 g/mole หรือ 55.84 g/mole ตามลำดับ)

$z$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา Oxidation/Reduction ( $z = 3$ )

$F$  คือ Faraday's constant (96,487 C/mole)

## บทที่ 4 ผลการทดลอง

### คุณลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

จากการเข้าไปเก็บตัวอย่างน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอแห่งหนึ่งในจังหวัดชลบุรี พบว่าน้ำเสียที่ถูกปล่อยออกมาเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียนั้นจะมีสีฟ้าจนถึงสีน้ำเงินเข้ม ซึ่งน้ำเสียที่ได้ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์มี 2 ส่วน คือ น้ำเสียที่ปล่อยลงบ่อรวบรวมน้ำเสียโดยที่ยังไม่มีการปรับสภาพค่า pH จะมีสีน้ำเงินเข้มมาก (ภาพซ้ายมือ) และน้ำเสียส่วนที่มีการปรับสภาพค่า pH แล้วก่อนที่จะนำเข้าสู่การบำบัดด้วยกระบวนการ Activated Sludge ต่อไป ซึ่งพบว่าสีของน้ำเสียมีความเข้มข้นที่จางลง (ภาพขวามือ) แสดงดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 ลักษณะน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

ผลการตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสีย ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ค่าความขุ่น (Turbidity) ค่าความเข้มสี (Color) ค่าซีโอดี (COD) และอุณหภูมิ (Temperature) แสดงดังตารางที่ 4-1 และตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-1 คุณลักษณะน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพค่า pH

No.	pH	Conductivity ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	TDS (mg/l)	Turbidity (NTU)	Color (mg/l)	COD (mg/l)	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	10.20	3,863	5,106	4.5	114.08	1010.0	30.1
2	10.21	3,748	5,052	4.5	114.08	*743.3	30.1
3	10.23	3,863	5,106	4.3	114.08	1,013.3	30.6
เฉลี่ย	10.21	3,824.7	5,088.0	4.4	114.08	1,011.7	30.3

หมายเหตุ \* ไม่ได้นำมาคิดค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4-2 คุณลักษณะน้ำเสียที่ผ่านการปรับสภาพค่า pH แล้ว

No.	pH	Conductivity ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	TDS (mg/l)	Turbidity (NTU)	Color (mg/l)	COD (mg/l)	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	7.88	3,485	1,638	40.7	60.609	596.7	30.6
2	7.87	3,414	1,605	40.5	60.174	*1,010.0	30.4
3	7.86	3,438	1,616	41.1	61.043	696.7	30.3
เฉลี่ย	7.87	3,445.7	1,619.7	40.8	60.609	646.7	30.4

หมายเหตุ \* ไม่ได้นำมาคิดค่าเฉลี่ย

ในการทดลองนี้ได้เตรียมน้ำสังเคราะห์สีรีแอกทีฟเพื่อเป็นตัวแทนของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ คุณลักษณะของน้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้นแสดงดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 คุณลักษณะของน้ำเสียที่สังเคราะห์ได้

Parameter	Syntetic Wastewater (pH 7)	Syntetic Wastewater (pH 10)
pH	7	10
Conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	2,166.3	2,166.3
COD (mg/l)	500.2	500.2
TDS (ppm)	1018.3	1018.3
Color (mg/l Pt)	100	100
Turbidity (NTU)	12.3	12.3
Pb (mg/l)	1.38	1.38
Cr (mg/l)	0.33	0.33

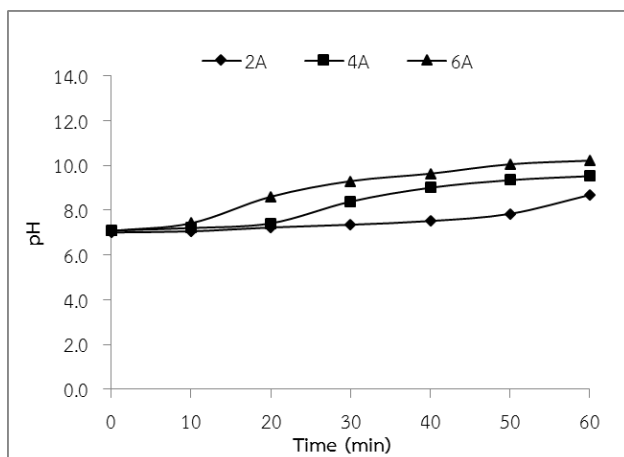
#### การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

ในการทดลองการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้านั้น ทำการทดลองโดยใช้แผ่นอิเล็กโทรดสองชนิด คือ แผ่นเหล็กและแผ่นอลูมิเนียม กำหนดกระแสไฟฟ้าที่ 2, 4 และ 6 แอมแปร์ (A) แต่ละการทดลองใช้เวลา 60 นาที โดยจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 10 นาที ตัวอย่างน้ำที่เก็บได้ในแต่ละช่วงเวลาถูกนำไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ค่าความขุ่น (Turbidity) ปริมาณอลูมิเนียมและเหล็กไอออนที่คงเหลือในน้ำภายหลังการบำบัด (Residual Aluminum หรือ Residual Iron) เพื่อนำไปคำนวณปริมาณอลูมิเนียมและเหล็กไอออนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4-2 ถึงภาพที่ 4-7

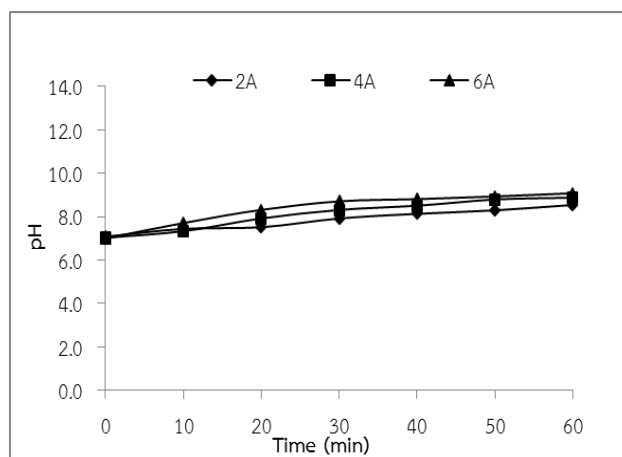
เมื่อพิจารณาผลที่เกิดขึ้นกับค่า pH จากการกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยแผ่นอิเล็กโทรดเหล็ก (ต่อไปนี้จะเรียกว่า EC แผ่นเหล็ก) และแผ่นอิเล็กโทรดอลูมิเนียม (ต่อไปนี้จะเรียกว่า EC แผ่นอลูมิเนียม) ที่มีต่อค่า pH ในน้ำ พบว่า การใช้ EC แผ่นเหล็กที่ pH 7 ส่งผลให้ ค่า pH ในน้ำ มีการเปลี่ยนแปลงในทางที่ทำให้ค่า pH สูงขึ้น หากมีการใช้กระแสไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น จาก 2A เป็น 4A และ 6A ก็จะทำให้ค่า pH เกิดการเปลี่ยนแปลงได้เร็วขึ้น โดยเห็นผลได้ชัดเจนที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 4A ภายหลังทำปฏิกิริยา 30 นาที ทำให้ค่า pH เปลี่ยนไปเป็น 8.39 ในขณะที่ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 6A ภายหลังทำปฏิกิริยาเพียง 20 นาที ทำให้ค่า pH เปลี่ยนไปเป็น 8.61 แต่ในกรณีของค่า pH เมื่อใช้ EC แผ่นเหล็กที่ pH 10 พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในน้ำเพียงเล็กน้อย เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการปฏิกิริยาพบว่าค่า pH ที่กระแสไฟฟ้า 2A, 4A และ 6A มีค่า pH เป็น 10.28, 10.47 และ 10.87 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน และผลลัพท์ที่ได้จะทำให้ไอออนของไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) ทำให้ค่า pH ของตัวอย่างน้ำมีค่าสูงขึ้น



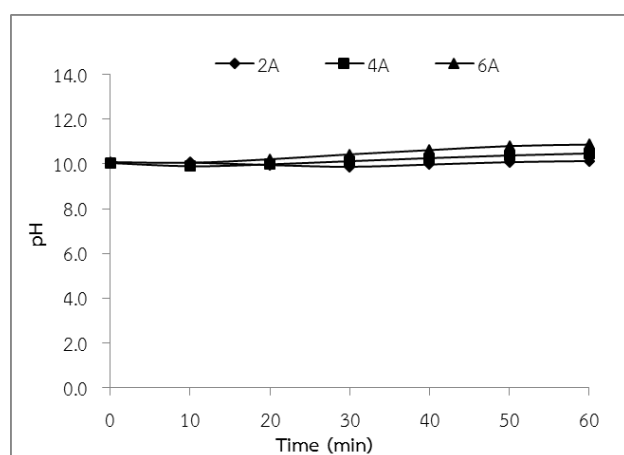
สำหรับผลที่เกิดขึ้นกับค่า pH เมื่อมีการใช้ EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7 พบว่าทุกๆ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีแนวโน้มทำให้ค่า pH สูงขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการปฏิบัติการพบว่าค่า pH ที่กระแสไฟฟ้า 2A, 4A และ 6A มีค่า pH เป็น 8.55, 8.88 และ 9.08 ตามลำดับ ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของค่า pH เมื่อมีการใช้ EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10 พบว่าค่า pH ที่กระแสไฟฟ้า 2A, 4A และ 6A มีแนวโน้มที่ลดลง โดยมีค่า pH ภายหลังสิ้นสุดปฏิบัติการเป็น 9.30, 9.34 และ 9.42 ตามลำดับ



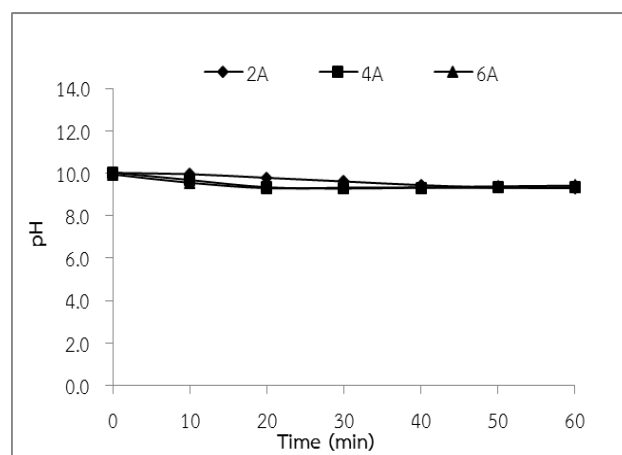
ก. EC แผ่นเหล็กที่ pH 7



ข. EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7

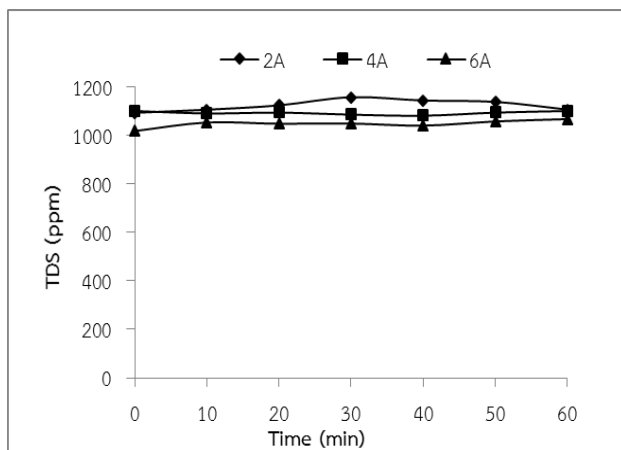


ค. EC แผ่นเหล็กที่ pH 10

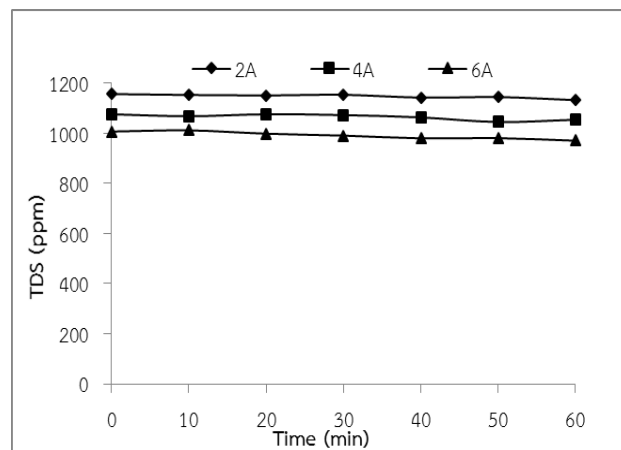


ง. EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10

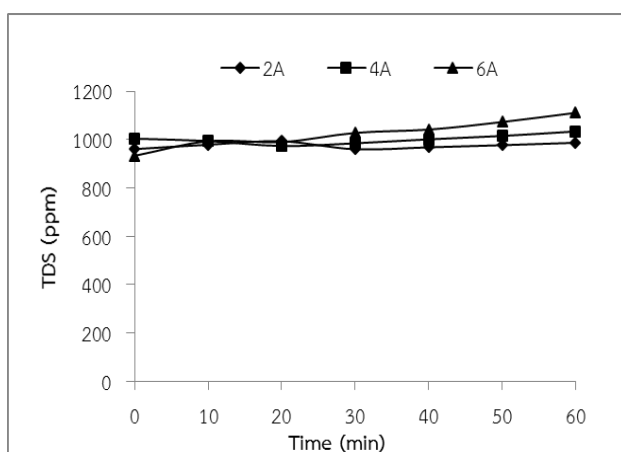
ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาในการทำปฏิบัติการ



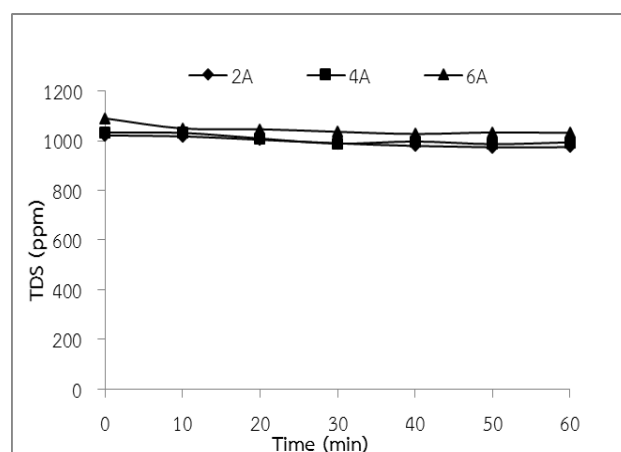
ก. EC แผ่นเหล็กที่ pH 7



ข. EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7



ค. EC แผ่นเหล็กที่ pH 10



ง. EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10

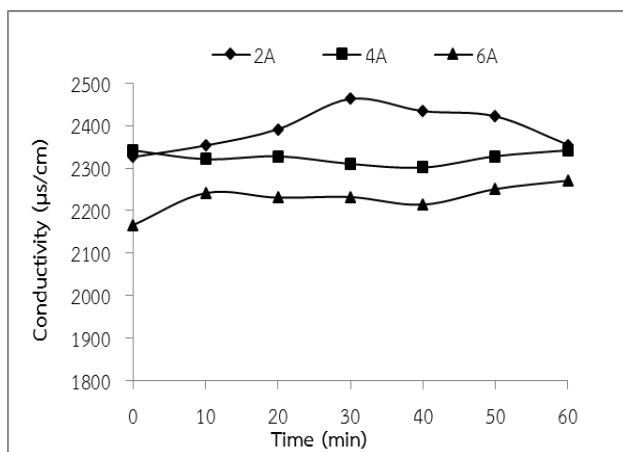
ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TDS กับเวลาในการทำปฏิกิริยา

เมื่อพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่า TDS ดังแสดงในภาพ 4-3 พบว่าในทุกๆ สภาพของการทดลองค่า TDS มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประจุบวกและลบจากปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การเกิด  $Fe^{3+}$  และ  $Al^{3+}$  ที่เกิดการปลดปล่อยผ่านการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าที่แผ่นอิเล็กโทรดที่ขั้วแอโนด และการเกิด  $OH^-$  ที่ขั้วแคโทด ผลจากการทดลองพบว่า ค่า TDS เมื่อมีการใช้ EC แผ่นเหล็กที่ pH 7 ที่กระแสไฟฟ้า 2A ทำให้ค่า TDS เพิ่มขึ้นจาก 1,093.67 ppm เป็น 1,107 pm ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 4A ค่า TDS มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ และกรณีใช้กระแสไฟฟ้า 6A พบว่า ค่า TDS เพิ่มขึ้นจาก 1,018.33 ppm เป็น 1,067.67 pm

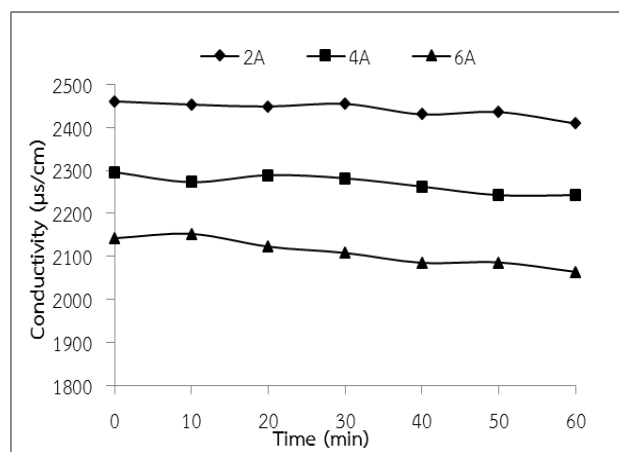
ค่า TDS เมื่อมีการใช้ EC แผ่นเหล็กที่ pH 10 ที่กระแสไฟฟ้า 2A ทำให้ค่า TDS เพิ่มขึ้นจาก 961.00 ppm เป็น 987.00 pm ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 4A ค่า TDS เพิ่มขึ้นจาก 1,004.00 ppm เป็น 1,034 ppm และที่กระแสไฟฟ้า 6A พบว่า ค่า TDS เพิ่มขึ้นจาก 933.33 ppm เป็น 1,111.00 pm

แต่ในกรณีของค่า TDS เมื่อมีการใช้ EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7 และ pH พบว่าค่า TDS มีแนวโน้มลดลง แสดงว่ามีการเปลี่ยนรูปสารประกอบต่างๆ ที่ละลายน้ำเป็นสารที่อยู่ในรูปไม่ละลายน้ำ พบว่าการใช้ EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7 กระแสไฟฟ้า 2A ทำให้ค่า TDS ลดลงจาก 1,157.00 ppm เป็น 1,132.67 ppm ในขณะที่กระแสไฟฟ้า 4A ทำให้ค่า TDS ลดลงจาก 1,076.33 ppm เป็น 1,054.33 ppm และที่กระแสไฟฟ้า 6A ทำให้ค่า TDS ลดลงจาก 1,007.33 ppm เป็น 970.67 pm ในขณะที่การใช้ EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10 กระแสไฟฟ้า 2A ทำให้ค่า TDS ลดลงจาก 1,021.33 ppm เป็น 974.33 ppm ในขณะที่กระแสไฟฟ้า 4A ทำให้ค่า TDS ลดลงจาก 1,033.33 ppm เป็น 993.67 pm และที่กระแสไฟฟ้า 6A ทำให้ค่า TDS ลดลงจาก 1,090.00 ppm เป็น 1,031.67 ppm

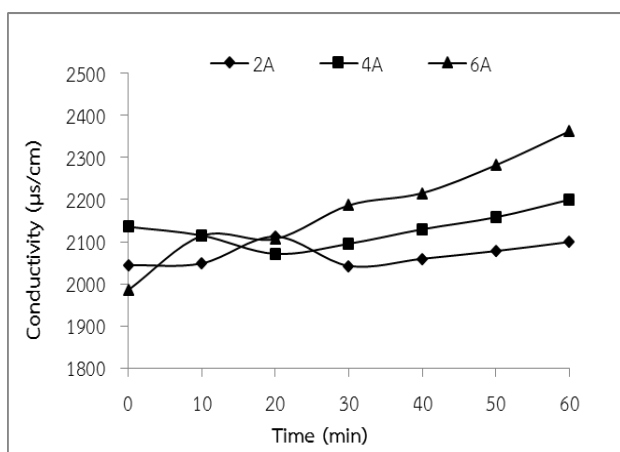
ทั้งนี้ค่า TDS และค่า Conductivity มีความสัมพันธ์กัน เมื่อพิจารณาจากความหมายของค่า TDS ซึ่งหมายถึงค่าผลรวมของของแข็งทั้งหมดที่ละลายอยู่ในน้ำ ในขณะที่ค่า EC คือ ความสามารถในการนำไฟฟ้า ทั้งนี้สามารถประมาณค่า TDS ได้จากค่า Conductivity หากมีค่า TDS ในตัวอย่างน้ำสูง ค่า Conductivity ก็ จะสูงขึ้น และหากมีค่า TDS ต่ำ ค่า Conductivity ก็ จะต่ำลง ผลการวิเคราะห์ค่า Conductivity แสดงดังภาพที่ 4-4



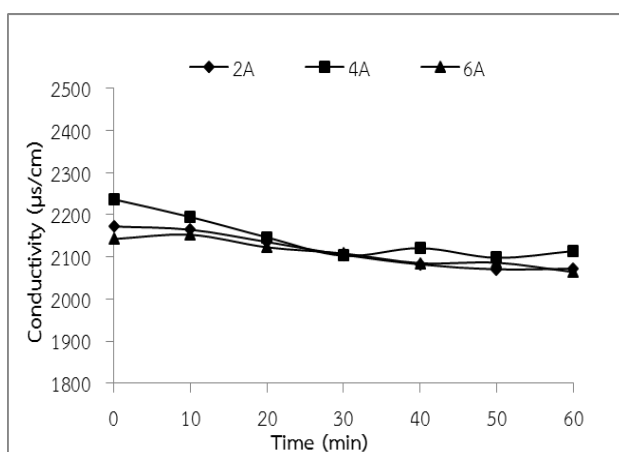
ก. EC แผ่นเหล็กที่ pH 7



ข. EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7



ค. EC แผ่นเหล็กที่ pH 10

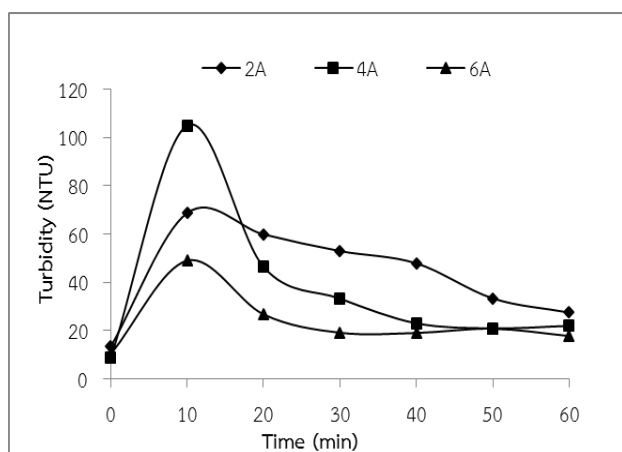


ง. EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10

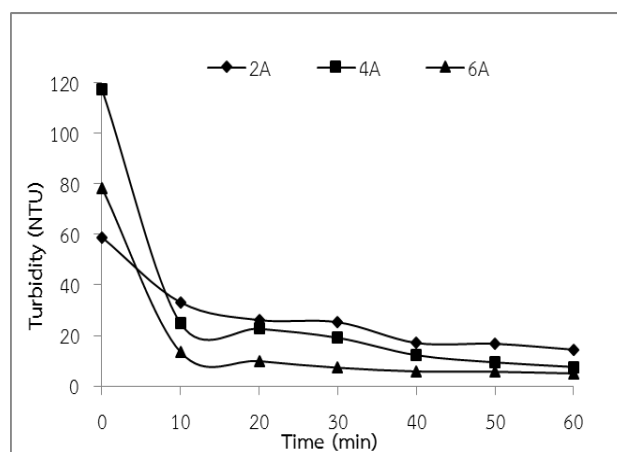
ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Conductivity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา

ค่า Conductivity เมื่อมีการใช้ EC แผ่นเหล็กที่ pH 7 ที่กระแสไฟฟ้า 2A มีการเปลี่ยนแปลงของค่า Conductivity จาก 2,326.33  $\mu\text{s}/\text{cm}$  เป็น 2,355.00  $\mu\text{s}/\text{cm}$  กระแสไฟฟ้า 4A มีแนวโน้มของค่า Conductivity คงที่ ในขณะที่กระแสไฟฟ้า 6A ทำให้ค่า Conductivity เพิ่มขึ้นจาก 2,166.00  $\mu\text{s}/\text{cm}$  เป็น 2,270.67  $\mu\text{s}/\text{cm}$  ในกรณีของการใช้ EC แผ่นเหล็กที่ pH 10 การเพิ่มขึ้นของค่า Conductivity มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกๆ กระแสไฟฟ้าที่ทำการทดลองเช่นเดียวกัน

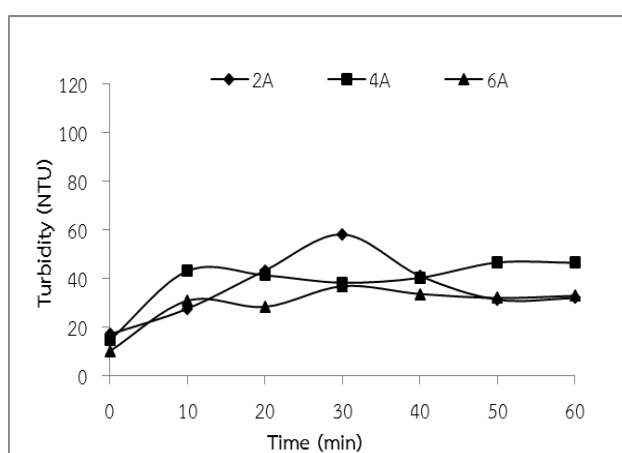
เมื่อพิจารณาค่า Conductivity เมื่อมีการใช้ EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7 และ pH 10 ในทุกๆ ปริมาณ กระแสไฟฟ้า พบว่าค่า Conductivity ในตัวอย่างน้ำมีแนวโน้มลดลง โดยค่า Conductivity เมื่อมีการใช้ EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7 ที่กระแสไฟฟ้า 2A มีค่า Conductivity ลดลงจาก 2,461.00  $\mu\text{s}/\text{cm}$  เป็น 2,409.33  $\mu\text{s}/\text{cm}$  ที่กระแสไฟฟ้า 4A ค่า Conductivity ลดลงจาก 2,296.33  $\mu\text{s}/\text{cm}$  เป็น 2,242.67  $\mu\text{s}/\text{cm}$  และที่ กระแสไฟฟ้า 6A ค่า Conductivity ลดลงจาก 2,142.67  $\mu\text{s}/\text{cm}$  เป็น 2,064.33  $\mu\text{s}/\text{cm}$  ในขณะที่การใช้ EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10 ค่า Conductivity มีแนวโน้มลดลงในทุกๆ กระแสไฟฟ้าที่ทำการทดลองเช่นเดียวกัน



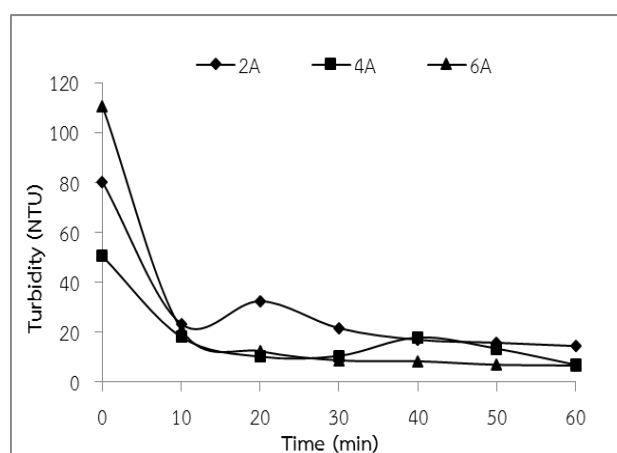
ก. EC แผ่นเหล็กที่ pH 7



ข. EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7



ค. EC แผ่นเหล็กที่ pH 10

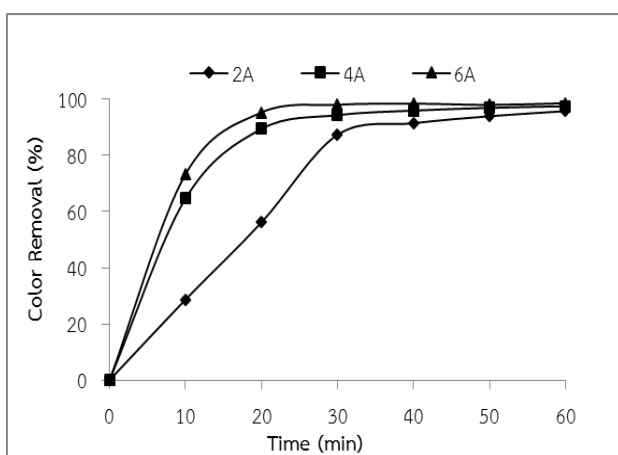


ง. EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10

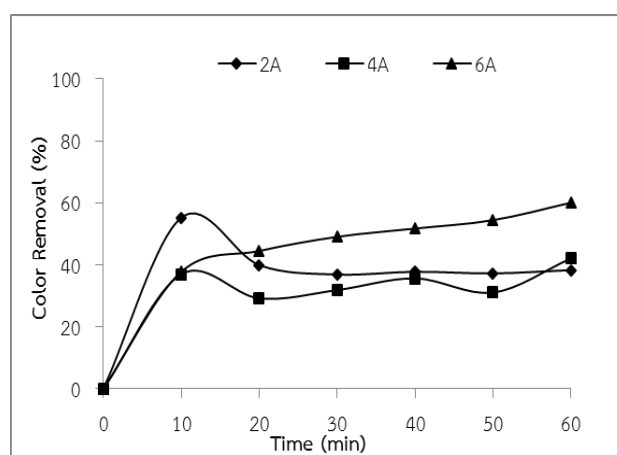
ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Turbidity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา

การลดลงของค่า TDS และค่า Conductivity สะท้อนให้เห็นว่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มีลดน้อยลง หรือเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นตะกอนหรือผลึกที่ไม่ละลายน้ำ มีแนวโน้มที่จะของแข็งต่างๆ จะแยกตัวออกจากน้ำได้ดีขึ้นหรือเร็วขึ้นผ่านกระบวนการตกตะกอนหรือกรองต่อไป ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคต่างๆ ในน้ำมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

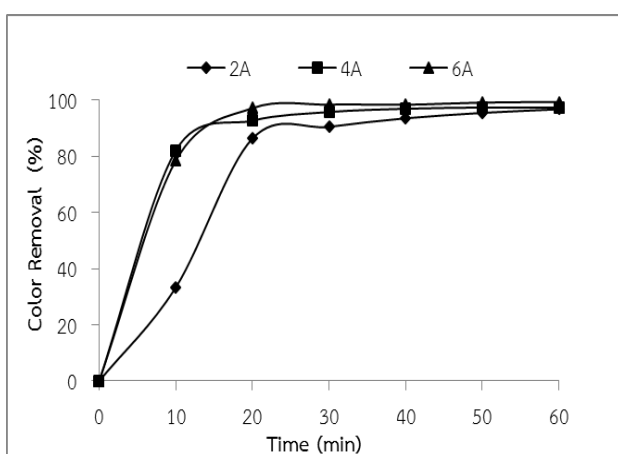
ค่าของ pH ที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากค่า OH- ในตัวอย่างน้ำสอดคล้องกับผลการตรวจวัดค่า Turbidity ในตัวอย่างน้ำ เมื่อใช้ EC แผ่นเหล็กที่ pH 7 และ pH 10 ภายหลังสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาที่กระแสไฟฟ้า 2A, 4A และ 6A ค่า Turbidity มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น หรือหมายถึงตัวอย่างน้ำมีความขุ่นมากขึ้น และอนุภาคเหล่านี้จะนำกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้นทำให้มีค่า TDS และ Conductivity สูงขึ้น ในขณะที่ค่า Turbidity ในตัวอย่างน้ำเมื่อใช้ EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH7 และ pH 10 ภายหลังสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาที่กระแสไฟฟ้า 2A, 4A และ 6A ค่า Turbidity มีแนวโน้มลดลง หรือหมายถึงตัวอย่างน้ำมีความใสมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า TDS และค่า Conductivity ที่มีแนวโน้มลดลง



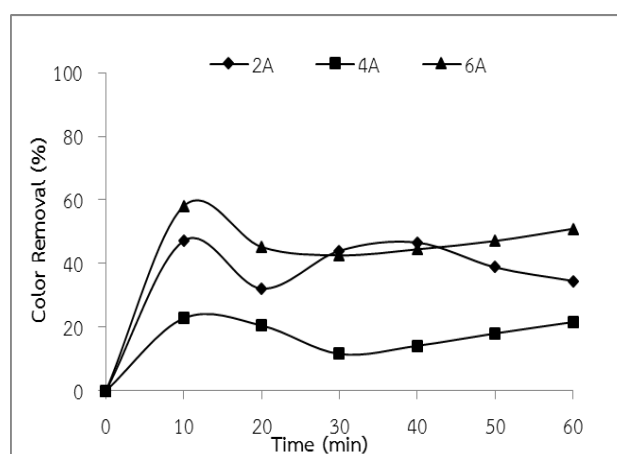
ก. EC แผ่นเหล็กที่ pH 7



ข. EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7



ค. EC แผ่นเหล็กที่ pH 10

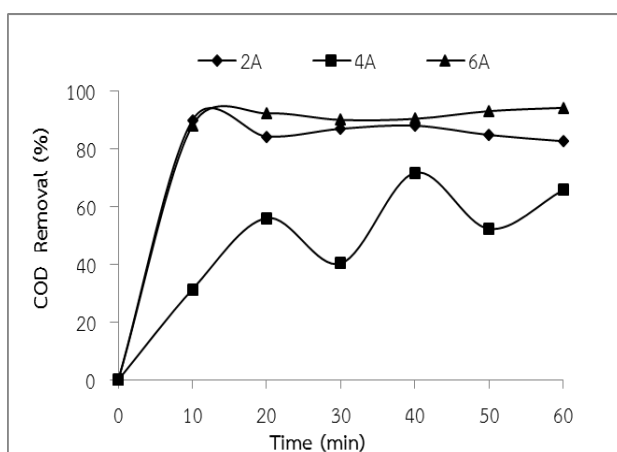


ง. EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10

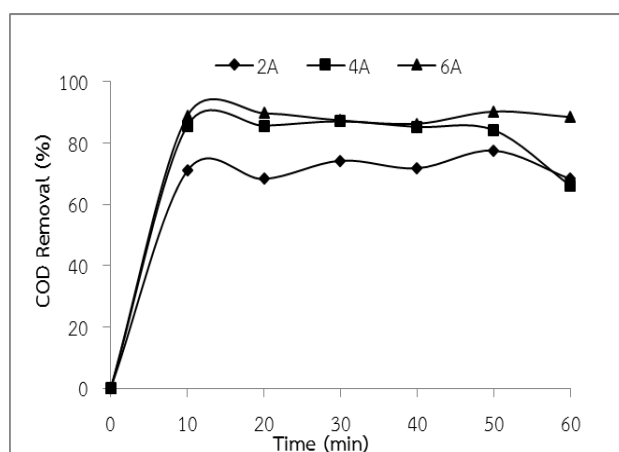
ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างการกำจัดสีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา

เมื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดสีในตัวอย่างน้ำแสดงดังภาพที่ 4-6 พบว่า เมื่อใช้ EC แผ่นเหล็กที่ pH 7 ปริมาณกระแสไฟฟ้า 2A, 4A และ 6A ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเป็น 95.80%, 97.53% และ 98.61% ตามลำดับ เมื่อใช้ EC แผ่นเหล็กที่ pH 10 ปริมาณกระแสไฟฟ้า 2A, 4A และ 6A ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเป็น 96.74% 97.37% และ 99.31% ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อใช้ EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7 ปริมาณกระแสไฟฟ้า 2A, 4A และ 6A พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีเพียง 38.29%, 42.05% และ 60.03% ตามลำดับ และเมื่อใช้ EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10 ปริมาณกระแสไฟฟ้า 2A, 4A และ 6A ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองอื่นๆ คือ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพียง 34.54%, 21.61% และ 50.93% ตามลำดับ

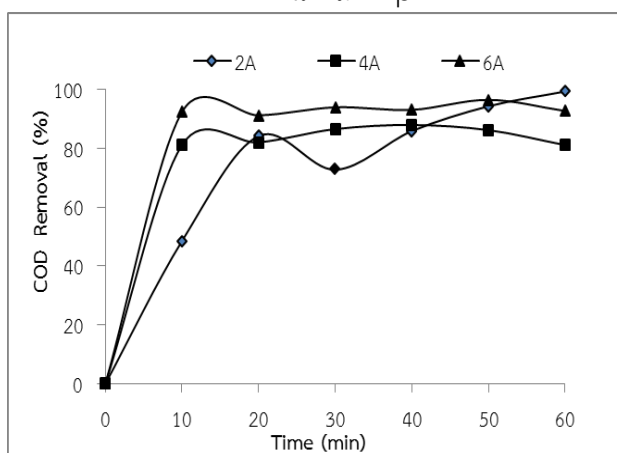
ผลของประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีในตัวอย่างน้ำเป็นไปในทำนองเดียวกับประสิทธิภาพการกำจัดสี คือ การใช้ EC แผ่นเหล็กที่ pH 7 และ pH 10 ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 6A มีค่าดีกว่าที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 4A และ 2A ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีไอดีเมื่อมีการใช้ EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7 และ pH 10 ในปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เทียบเท่ากัน แสดงผลการทดลองดังภาพที่ 4-7 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการใช้ EC แผ่นเหล็ก ส่งผลให้ปริมาณสีและค่าซีไอดีในตัวอย่างน้ำถูกกำจัดออกไปได้ดีกว่าการใช้ EC แผ่นอลูมิเนียม ทั้งสองสภาวะ pH ที่ทำการทดลอง



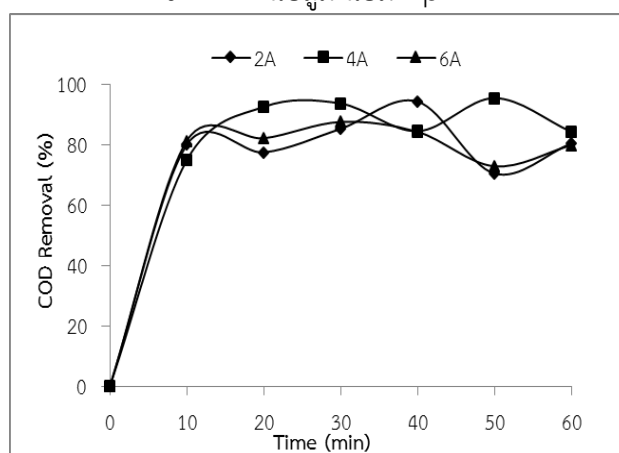
ก. EC แผ่นเหล็กที่ pH 7



ข. EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7



ค. EC แผ่นเหล็กที่ pH 10



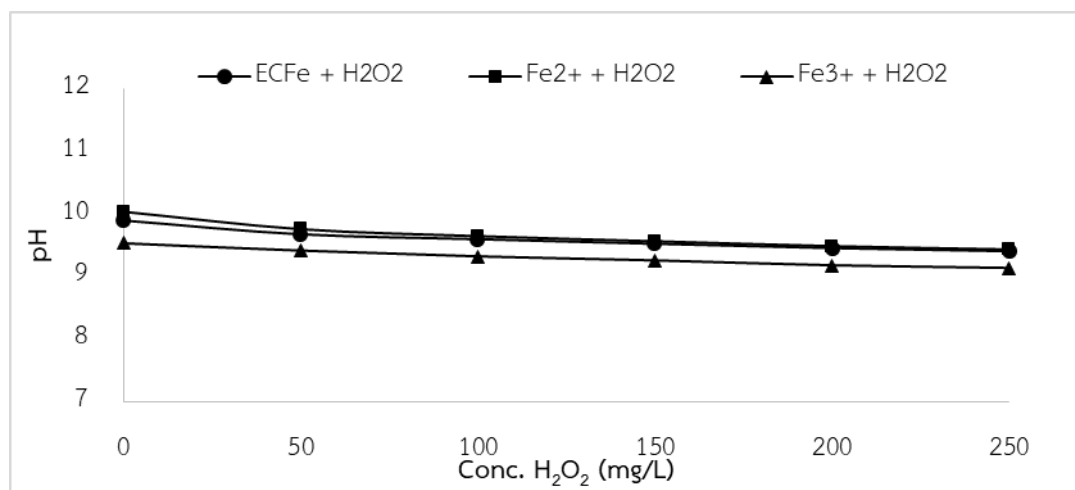
ง. EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10

ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างการกำจัดซีไอดีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา

## การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าตามด้วยเฟนตัน

จากผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าพบว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดค่าความสกปรกในน้ำในรูปแบบต่างๆ คือ การใช้ EC แผ่นเหล็กที่ pH 10 กระแสไฟฟ้า 2A โดยค่า pH นี้เป็นค่า pH ที่ใกล้เคียงกับคุณลักษณะของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ หากจะประยุกต์และนำระบบ EC ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอมย้อมสิ่งทอทดแทนหรือเพิ่มขึ้นจากระบบบำบัดน้ำเสียเดิม ก็สามารถทำได้เลยโดยไม่ต้องสภาพความเป็นกรดต่างในน้ำเสีย ในขณะที่การเลือกใช้กระแสไฟฟ้าที่ 2A จะทำให้ค่าใช้ในการเดินระบบบำบัดมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้กระแสไฟฟ้าที่ 4A และ 6A ดังจะได้อธิบายในส่วนการวิเคราะห์หาต้นทุนการดำเนินการต่อไป

ในการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสีที่ตกค้างในน้ำ ทำการออกแบบชุดทดลองจำนวน 3 การทดลอง ได้แก่ (1) การทดลองด้วย EC แผ่นเหล็ก ที่ pH 7 ปริมาณกระแสไฟฟ้า 2A โดยเก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะเวลา 30 นาทีของการทดลอง เพื่อมาทำการทดลองกับ  $H_2O_2$  ที่ความเข้มข้นในช่วง 50-250 mg/L ตามลำดับ (เรียกการทดลองนี้ว่า  $EC_{Fe} + H_2O_2$ ) (2) การทดลองการทำปฏิกิริยากับ  $Fe^{2+}$  กับ  $H_2O_2$  ที่ความเข้มข้นในช่วง 50-250 mg/L โดยใช้ปริมาณ  $Fe^{2+}$  เทียบเท่ากับปริมาณ  $Fe^{3+}$  ที่ใช้ไปในการทดลอง EC (เรียกการทดลองนี้ว่า  $Fe^{2+} + H_2O_2$ ) และ (3) การทดลองการทำปฏิกิริยากับ  $Fe^{3+}$  กับ  $H_2O_2$  ที่ความเข้มข้นในช่วง 50-250 mg/L โดยใช้ปริมาณ  $Fe^{3+}$  เทียบเท่ากับปริมาณ  $Fe^{3+}$  ที่ใช้ไปในการทดลอง EC (เรียกการทดลองนี้ว่า  $Fe^{3+} + H_2O_2$ ) ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4-8 ถึงภาพที่ 4-14

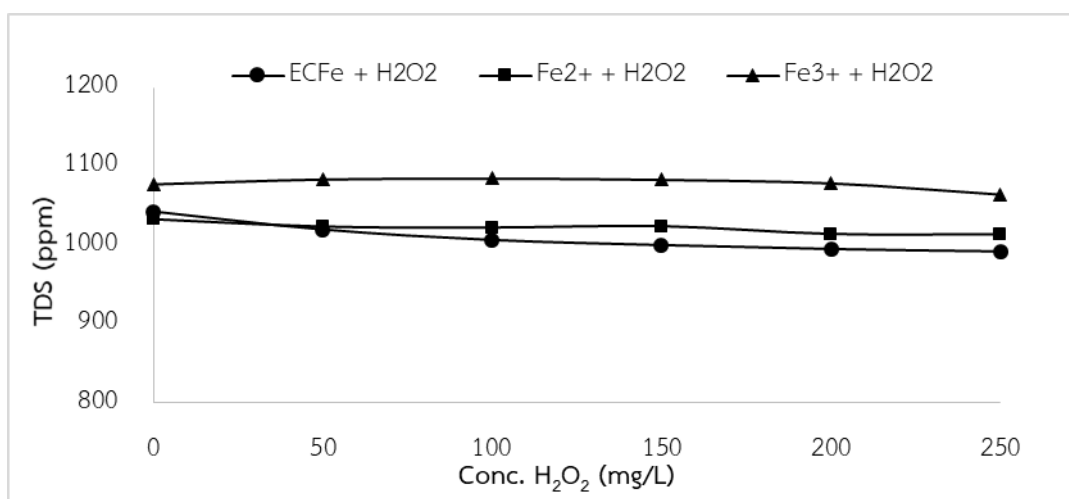


ภาพที่ 4-8 ผลการวิเคราะห์ค่า pH โดยกระบวนการเฟนตัน

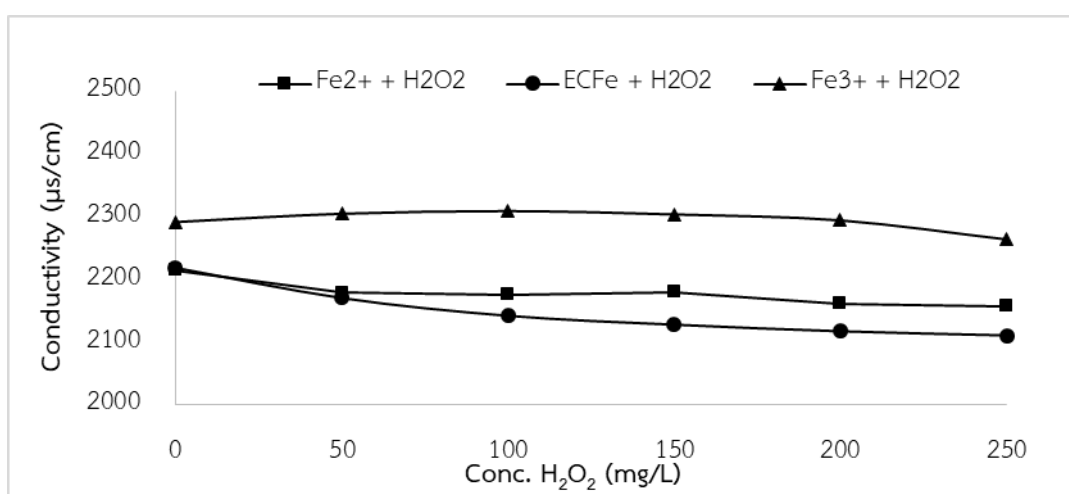
ผลการวิเคราะห์ค่า pH โดยกระบวนการเฟนตันแสดงดังภาพที่ 4-8 พบว่าในทุกๆ สถานะของการทดลอง ภายหลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยาค่า pH ในตัวอย่างน้ำมีแนวโน้มลดลง โดยค่า pH ในชุดการทดลองที่ (1)  $EC_{Fe} + H_2O_2$  ลดลงจาก 9.9 เหลือ 9.4 ค่า pH ในชุดการทดลองที่ (2)  $Fe^{2+} + H_2O_2$  ลดลงจาก 10.0 เหลือ 9.4 และค่า pH ในชุดการทดลองที่ (3)  $Fe^{3+} + H_2O_2$  ลดลงจาก 9.5 เหลือ 9.1 การลดลงของค่า pH ในตัวอย่างน้ำเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมีที่มีการปลดปล่อย  $H^+$  อิสระ และหากในตัวอย่างน้ำมีค่า  $OH^-$  ในรูปต่างๆ เพื่อไป

ทำการสะท้อนค่า  $H^+$  ไม่เพียงพอก็จะทำให้ค่า pH ในตัวอย่างน้ำลดลง อย่างไรก็ตามผลสืบเนื่องจากการลดลงของค่า pH ทำให้การปล่อยน้ำทิ้งภายหลังการบำบัดขั้นสุดท้ายทำได้โดยสะดวกขึ้น เนื่องด้วยค่ามาตรฐานของการปล่อยน้ำทิ้งออกจากโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้มีค่า pH อยู่ในช่วง 4-9

ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของค่า TDS และ ค่า Conductivity โดยกระบวนการเฟนตันแสดงดังภาพที่ 4-9 และ 4-10 ตามลำดับ พบว่า ค่า TDS และค่า Conductivity มีแนวโน้มลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง โดยการทดลองที่ (1)  $EC_{Fe} + H_2O_2$  ค่า TDS ลดลงจาก 1,043.2 ppm เหลือ 992.5 ppm และค่า Conductivity ลดลงจาก 2,219.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$  เหลือ 2,111.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$  สำหรับการทดลองที่ (2)  $Fe^{2+} + H_2O_2$  ค่า TDS ลดลงจาก 1,033.3 ppm เหลือ 1,014.3 ppm และค่า Conductivity ลดลงจาก 2,215.3  $\mu\text{s}/\text{cm}$  เหลือ 2,157.5  $\mu\text{s}/\text{cm}$  และในการทดลองที่ (3)  $Fe^{3+} + H_2O_2$  ค่า TDS ลดลงจาก 1,077.5 ppm เหลือ 1,064.5 ppm และค่า Conductivity ลดลงจาก 2,292.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$  เหลือ 2,264.3  $\mu\text{s}/\text{cm}$  ตามลำดับ



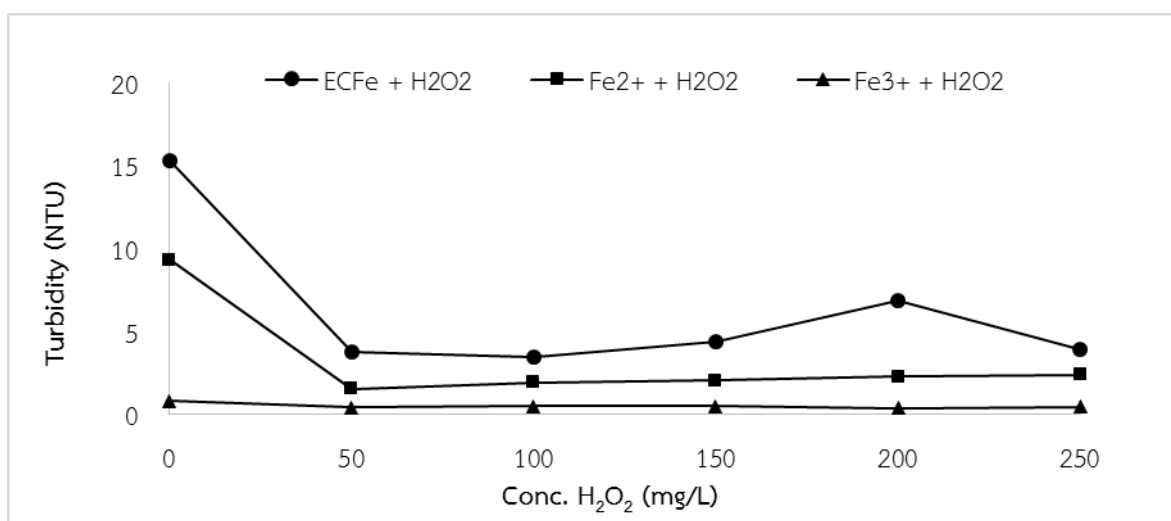
ภาพที่ 4-9 ผลการวิเคราะห์ค่า TDS โดยกระบวนการเฟนตัน



ภาพที่ 4-10 ผลการวิเคราะห์ค่า Conductivity โดยกระบวนการเฟนตัน

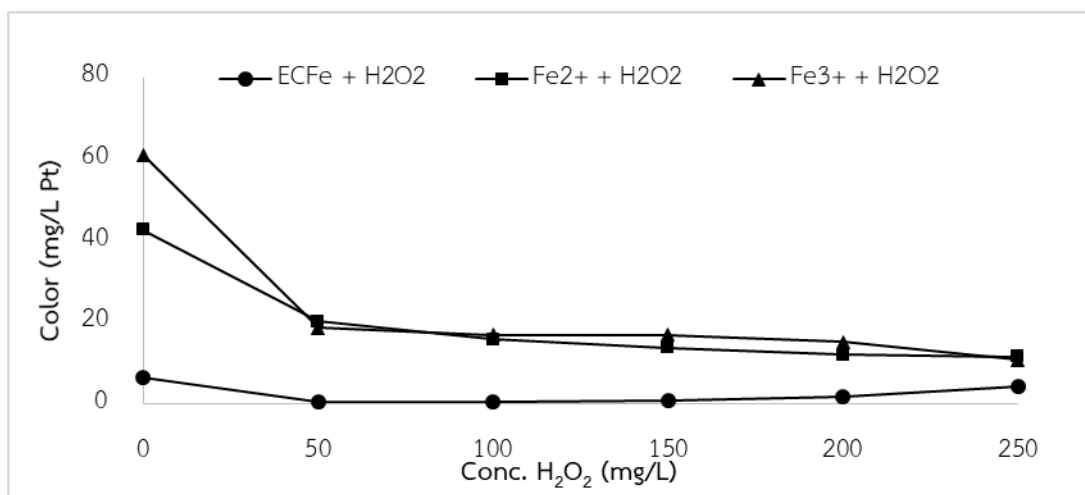


เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของทั้ง 3 การทดลองแสดงดังภาพที่ 4-11 พบว่า การใช้ปริมาณ  $\text{H}_2\text{O}_2$  เพียง 50 mg/L ส่งผลให้ความขุ่นในตัวอย่างน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ การทดลองที่ (1)  $\text{EC}_{\text{Fe}} + \text{H}_2\text{O}_2$  ทำให้ค่าความขุ่นลดลงจาก 15.3 NTU เหลือ 3.9 NTU คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ 75.1% ในขณะที่การทดลองที่ (2)  $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$  ค่าความขุ่นลดลงจาก 9.3 NTU เหลือ 1.6 NTU คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ 82.8% และการทดลองที่ (3)  $\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O}_2$  ค่าความขุ่นลดลงจาก 0.8 NTU เหลือ 0.4 NTU คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ 50.0% ตามลำดับ หลังจากนั้นการเพิ่มขึ้นของค่า  $\text{H}_2\text{O}_2$  จาก 50 mg/L เป็น 250 mg/L ไม่ได้ส่งผลต่อการกำจัดค่าความขุ่นในตัวอย่างน้ำอย่างมีนัยสำคัญ



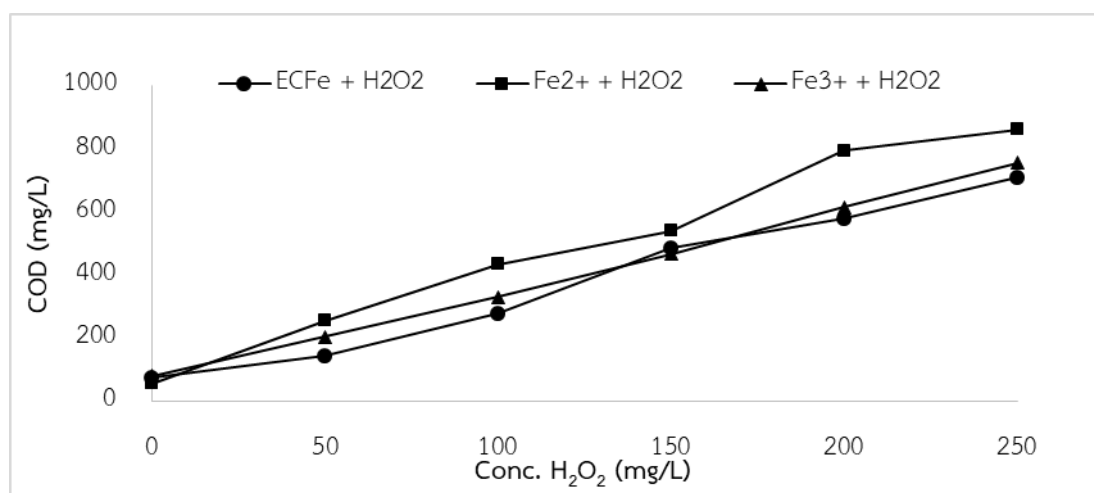
ภาพที่ 4-11 ผลการวิเคราะห์ค่า Turbidity โดยกระบวนการเพนตัน

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดความสีของทั้ง 3 การทดลองแสดงดังภาพที่ 4-12 พบว่า การใช้ปริมาณ  $\text{H}_2\text{O}_2$  เพียง 50 mg/L ส่งผลให้สีในตัวอย่างน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกับการกำจัดค่าความขุ่นออกจากตัวอย่างน้ำ ผลจากการทดลองที่ (1)  $\text{EC}_{\text{Fe}} + \text{H}_2\text{O}_2$  ทำให้ค่าสีลดลงจาก 6.3 mg/L Pt เหลือ 0.5 mg/L Pt คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ 92.1% ในขณะที่การทดลองที่ (2)  $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$  ค่าสีลดลงจาก 42.7 mg/L Pt เหลือ 20.1 mg/L Pt คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ 52.9% และการทดลองที่ (3)  $\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O}_2$  ค่าสีลดลงจาก 61.1 mg/L Pt เหลือ 18.6 mg/L Pt คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ 69.6% ตามลำดับ หลังจากนั้นการเพิ่มขึ้นของค่า  $\text{H}_2\text{O}_2$  จาก 50 mg/L เป็น 250 mg/L ไม่ได้ส่งผลต่อการกำจัดสีในตัวอย่างน้ำอย่างมีนัยสำคัญ

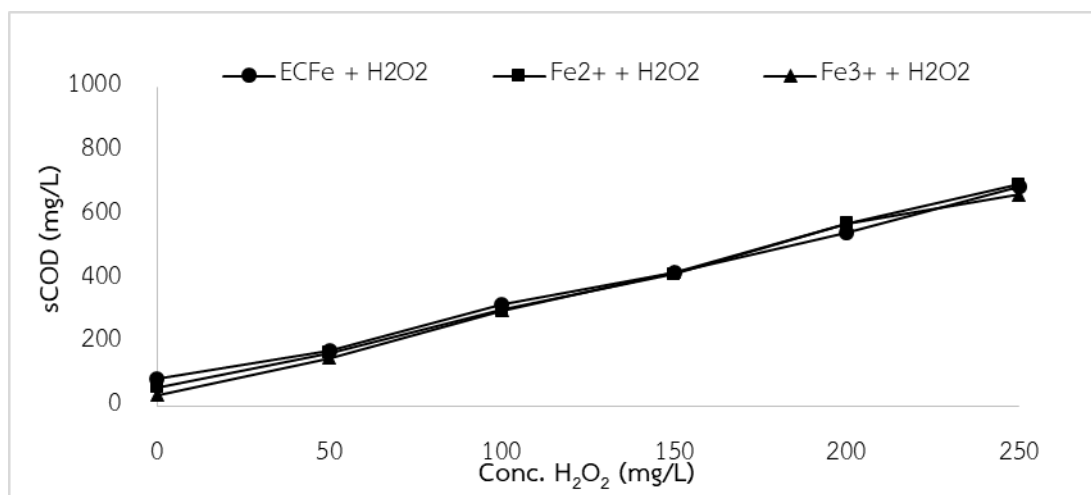


ภาพที่ 4-12 ผลการวิเคราะห์ค่าสีโดยกระบวนการเฟนตัน

เนื่องด้วยปฏิกิริยาของเฟนตันที่เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{Fe}^{2+}$  กับ  $\text{H}_2\text{O}_2$  หรือปฏิกิริยาของเฟนตันเสมือน (Fenton Like Process) ที่เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{Fe}^{3+}$  กับ  $\text{H}_2\text{O}_2$  โดยการใช้  $\text{Fe}^{2+}$  หรือ  $\text{Fe}^{3+}$  ทำหน้าที่เป็นคะตะลิสต์แล้วทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^\cdot$ ) ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดขึ้นระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเฟอร์รัสไอออน อนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นนี้มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงมาก ทำให้รีเอเจนท์ของปฏิกิริยาเฟนตันสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้หลากหลายทั้งสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากและสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ สืบเนื่องจากเหตุผลข้างต้นการใช้ปริมาณ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดการแตกตัวสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ที่เกิดการรวมตัวและอยู่ตัวมีเสถียรภาพจากการเติม  $\text{Fe}^{2+}$  หรือ  $\text{Fe}^{3+}$  แล้วให้กลับมาไม่มีเสถียรภาพหรืออยู่ในรูปละลายน้ำอีกครั้ง ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองดังภาพที่ 4-12 และ 4-14 ที่แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ที่ใช้ในการทดลองกลับทำให้ค่า COD และ sCOD ในตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4-13 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยกระบวนการเฟนตัน



ภาพที่ 4-14 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีละลายน้ำโดยกระบวนการเฟนตัน

เมื่อพิจารณาพร้อมกับประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในรูป Pb และ Cr แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4-4 พบว่าการทดลองที่ (1)  $EC_{Fe} + H_2O_2$  มีประสิทธิภาพในการกำจัด Pb และ Cr ได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับผลการทดลองอื่นๆ โดยประสิทธิภาพในการกำจัด Pb มีมากกว่า 93%-98% ที่ความเข้มข้น  $H_2O_2$  50-250 mg/L ที่ใช้งาน และประสิทธิภาพในการกำจัด Cr มีมากกว่า 99% ในทุกความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้งาน

ในขณะที่การทดลองที่ (2)  $Fe^{2+} + H_2O_2$  พบว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น  $H_2O_2$  จาก 50 mg/L เป็น 250 mg/L ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัด Pb มีแนวโน้มดีขึ้น ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการกำจัด Pb มีค่าอยู่ในช่วง 85.5%-88.9% ในขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัด Cr มีแนวโน้มลดลง หากมีการเติม  $H_2O_2$  เพิ่มขึ้นจาก 50 mg/L เป็น 250 mg/L พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด Cr เปลี่ยนจาก 31.8% เป็นไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัด หมายถึง มีการชะละลายของ Cr กลับมาในตัวอย่างน้ำอีกครั้งนั่นเอง ซึ่งเป็นไปในการทำงานเดียวกันกับการทดลองที่ (3)  $Fe^{3+} + H_2O_2$  ที่การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น  $H_2O_2$  จาก 50 mg/L เป็น 250 mg/L ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัด Cr ลดลง

จากผลการทดลองนี้สรุปได้ว่าการทดลองที่ (1)  $EC_{Fe} + H_2O_2$  ที่เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยแผ่นเหล็ก ที่ pH 10 ตามด้วยการเติม  $H_2O_2$  ที่ความเข้มข้นเพียง 50 mg/L เป็นเงื่อนไขการเดินระบบที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วยเงื่อนไขอื่นๆ ทำให้คุณลักษณะของพารามิเตอร์ต่างๆ ในเสียได้ขึ้นได้แก่ ค่าสี ความขุ่น การกำจัดโลหะหนักในรูปตะกั่ว (Pb) และโครเมียม (Cr) แต่จะทำให้ค่า COD และ sCOD ในตัวอย่างน้ำเพิ่มสูงขึ้น อาจเนื่องมาจากการสลายตัวของอินทรีย์สารที่ย่อยยากให้อยู่ในรูปที่ย่อยง่ายซึ่งจะเป็นผลดีต่อกระบวนการบำบัดทางชีวภาพในขั้นต่อไป

ตารางที่ 4-4 ประสิทธิภาพการกำจัด Pb และ Cr ด้วยวิธีการต่างๆ

วิธีการ	Pb (mg/L)	Cr (mg/L)	Pb Removal (%)	Cr Removal (%)
การทดลองที่ (1) $EC_{Fe} + H_2O_2$				
EC แผ่นเหล็ก Fe + $H_2O_2$ 0 mg/l	0.0167 (N/D)	N/A	> 98%	> 99%
EC แผ่นเหล็ก Fe + $H_2O_2$ 50 mg/l	0.0215 (N/D)	N/A	> 98%	> 99%
EC แผ่นเหล็ก Fe + $H_2O_2$ 100 mg/l	0.0662 (N/D)	N/A	> 95%	> 99%
EC แผ่นเหล็ก Fe + $H_2O_2$ 150 mg/l	0.0717 (N/D)	N/A	> 94%	> 99%
EC แผ่นเหล็ก Fe + $H_2O_2$ 200 mg/l	0.0719 (N/D)	N/A	> 94%	> 99%
EC แผ่นเหล็ก Fe + $H_2O_2$ 250 mg/l	0.0952 (N/D)	N/A	> 93%	> 99%
การทดลองที่ (2) $Fe^{2+} + H_2O_2$				
$Fe^{2+} + H_2O_2$ 0 mg/l	0.2135	0.2241	84.6	32.7
$Fe^{2+} + H_2O_2$ 50 mg/l	0.1923	0.2269	86.1	31.8
$Fe^{2+} + H_2O_2$ 100 mg/l	0.1797	0.3826	87.0	0.0
$Fe^{2+} + H_2O_2$ 150 mg/l	0.2826	0.5851	79.6	0.0
$Fe^{2+} + H_2O_2$ 200 mg/l	0.1541	0.6085	88.9	0.0
$Fe^{2+} + H_2O_2$ 250mg/l	0.1999	0.6589	85.5	0.0
การทดลองที่ (3) $Fe^{3+} + H_2O_2$				
$Fe^{3+} + H_2O_2$ 0 mg/l	0.1406	N/A	89.82	> 99%
$Fe^{3+} + H_2O_2$ 50 mg/l	0.1591	0.1770	88.5	46.8
$Fe^{3+} + H_2O_2$ 100mg/l	0.1604	0.4296	88.4	0.0
$Fe^{3+} + H_2O_2$ 150 mg/l	0.1538	0.7877	88.9	0.0
$Fe^{3+} + H_2O_2$ 200 mg/l	0.1811	0.8030	86.9	0.0
$Fe^{3+} + H_2O_2$ 250 mg/l	0.1482	0.8580	89.3	0.0

หมายเหตุ: ค่าต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ในเชิงปริมาณ (Limit of Determination; LOD) สำหรับ Pb และ Cr เท่ากับ 0.15 ppm

### การวิเคราะห์หาต้นทุนการดำเนินการ

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนในการดำเนินการระหว่างการใช้โอเล็กโทรดแผ่นเหล็กและแผ่นอลูมิเนียม โดยใช้สมการที่ 3-1, 3-2 และ 3-3 โดยคิดค่ากระแสที่ 3.5 บาท/kWh และราคาแผ่นเหล็กที่ 23 บาท/kg ผลการคำนวณที่ได้แสดงดังตารางที่ 4-5 ถึง 4-7

- การเดินระบบ EC ด้วยแผ่นเหล็ก Fe ที่ pH 10 กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ นาน 30 นาที	<b>47.36 บาท/m<sup>3</sup></b>
- การเดินระบบ EC ด้วยแผ่นเหล็ก Fe ที่ pH 7 กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ นาน 40 นาที	59.63 บาท/m <sup>3</sup>
- การเดินระบบ EC ด้วยแผ่นเหล็ก Fe ที่ pH 10 กระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์ นาน 20 นาที	87.16 บาท/m <sup>3</sup>
- การเดินระบบ EC ด้วยแผ่นเหล็ก Fe ที่ pH 7 กระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์ นาน 30 นาที	100.33 บาท/m <sup>3</sup>
- การเดินระบบ EC ด้วยแผ่นเหล็ก Fe ที่ pH 10 กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ นาน 20 นาที	155.5 บาท/m <sup>3</sup>
- การเดินระบบ EC ด้วยแผ่นเหล็ก Fe ที่ pH 7 กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ นาน 20 นาที	105.71 บาท/m <sup>3</sup>

สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนในการดำเนินการด้วยการใช้โอเล็กโทรดแผ่นอลูมิเนียม แสดงดังตารางที่ 4-8 ถึงตารางที่ 4-10

ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบในการกำจัดสีออกจากตัวอย่างน้ำเสียพบว่าสีในน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วย EC แผ่นอลูมิเนียมแล้ว สีในตัวอย่างน้ำยังคงปรากฏสีน้ำเงินให้เห็นอย่างชัดเจน ซึ่งแตกต่างจากการใช้โอเล็กโทรดแผ่นเหล็ก ที่สีในตัวอย่างน้ำเสียมีสีน้ำเงินที่จางลงจนเกือบไม่เห็นสีน้ำเงิน ดังนั้น สามารถสรุปผลการทดลองวิจัยครั้งนี้ได้ว่าการเดินระบบ EC ด้วยแผ่นเหล็ก Fe ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ ระยะเวลา 30 นาที เป็นสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบในเชิงคุณลักษณะของน้ำที่บำบัด ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด และค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียต่อ 1 m<sup>3</sup>

ตารางที่ 4-5 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายจากการเดินระบบ EC ด้วยแผ่นเหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์

เวลา (นาท)	pH 7					pH 10				
	$\Delta$ mtheo (mg/l)	Fe ที่เหลือ (mg/l)	Fe ที่ใช้ไป (mg/l)	Fe ที่ใช้ไป (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าใช้จ่าย (บาท/m <sup>3</sup> )	$\Delta$ mtheo (mg/l)	Fe ที่เหลือ (mg/l)	Fe ที่ใช้ไป (mg/l)	Fe ที่ใช้ไป (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าใช้จ่าย (บาท/m <sup>3</sup> )
10	38.97	8.61	30.36	0.0304	15.00	39.36	36.34	3.01	0.0030	15.70
20	78.32	7.68	70.64	0.0706	30.04	79.48	24.37	55.11	0.0551	32.19
30	117.49	9.97	107.51	0.1075	45.10	119.22	45.29	73.93	0.0739	<b>47.36</b>
40	155.88	8.79	147.09	0.1471	<b>59.63</b>	159.74	54.50	105.24	0.1052	63.28
50	194.85	10.37	184.48	0.1845	74.16	200.63	49.11	151.53	0.1515	79.12
60	233.82	11.82	222.00	0.2220	88.53	239.60	49.50	190.10	0.1901	93.73

ตารางที่ 4-6 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายจากการเดินระบบ EC ด้วยแผ่นเหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์

เวลา (นาท)	pH 7					pH 10				
	$\Delta$ mtheo (mg/l)	Fe ที่เหลือ (mg/l)	Fe ที่ใช้ไป (mg/l)	Fe ที่ใช้ไป (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าใช้จ่าย (บาท/m <sup>3</sup> )	$\Delta$ mtheo (mg/l)	Fe ที่เหลือ (mg/l)	Fe ที่ใช้ไป (mg/l)	Fe ที่ใช้ไป (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าใช้จ่าย (บาท/m <sup>3</sup> )
10	77.55	12.91	64.65	0.0646	49.61	77.36	2.34	75.02	0.0750	44.14
20	154.72	10.27	144.45	0.1444	74.42	154.72	2.16	152.56	0.1526	<b>87.10</b>
30	232.66	10.00	222.66	0.2227	<b>100.33</b>	232.08	5.68	226.40	0.2264	129.18
40	310.21	7.57	302.64	0.3026	125.70	308.67	5.59	303.08	0.3031	168.75
50	387.76	9.46	378.30	0.3783	150.32	385.83	10.00	375.83	0.3758	207.76
60	466.47	9.32	457.15	0.4571	173.65	463.00	13.78	449.22	0.4492	247.40

ตารางที่ 4-7 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายจากการเดินระบบ EC ด้วยแผ่นเหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์

เวลา (นาท)	pH 7					pH 10				
	$\Delta$ mtheo (mg/l)	Fe ที่เหลือ (mg/l)	Fe ที่ใช้ไป (mg/l)	Fe ที่ใช้ไป (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าใช้จ่าย (บาท/m <sup>3</sup> )	$\Delta$ mtheo (mg/l)	Fe ที่เหลือ (mg/l)	Fe ที่ใช้ไป (mg/l)	Fe ที่ใช้ไป (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าใช้จ่าย (บาท/m <sup>3</sup> )
10	116.33	23.53	92.80	0.0928	53.12	115.75	2.70	113.05	0.1130	79.26
20	232.27	7.87	224.40	0.2244	<b>105.71</b>	231.50	4.05	227.45	0.2274	<b>155.53</b>
30	347.83	9.84	337.99	0.3380	156.47	347.25	8.38	338.87	0.3389	226.56
40	463.00	7.74	455.26	0.4553	204.64	463.00	10.90	452.10	0.4521	303.95
50	578.75	10.89	567.86	0.5679	248.72	578.75	8.38	570.37	0.5704	411.11
60	694.50	10.63	683.87	0.6839	292.89	694.50	10.36	684.14	0.6841	579.01

ตารางที่ 4-8 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายจากการเดินระบบ EC ด้วยแผ่นอลูมิเนียม ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์

เวลา (นาท)	pH 7					pH 10				
	$\Delta$ mtheo (mg/l)	Al ที่เหลือ (mg/l)	Al ที่ใช้ไป (mg/l)	Al ที่ใช้ไป (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าใช้จ่าย (บาท/m <sup>3</sup> )	$\Delta$ mtheo (mg/l)	Al ที่เหลือ (mg/l)	Al ที่ใช้ไป (mg/l)	Al ที่ใช้ไป (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าใช้จ่าย (บาท/m <sup>3</sup> )
10	12.37	2.42	9.95	0.0099	15.67	12.43	2.42	10.01	0.0100	18.00
20	24.73	2.94	21.79	0.0218	32.57	24.86	2.94	21.92	0.0219	36.32
30	37.29	8.15	29.14	0.0291	47.47	37.29	8.15	29.14	0.0291	57.51
40	49.71	8.41	41.31	0.0413	62.05	49.71	8.41	41.31	0.0413	75.74
50	62.14	5.72	56.42	0.0564	77.18	62.14	5.72	56.42	0.0564	95.07
60	74.57	22.29	52.28	0.0523	92.61	74.57	22.29	52.28	0.0523	114.08

ตารางที่ 4-9 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายจากการเดินระบบ EC ด้วยแผ่นอลูมิเนียม ที่กระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์

เวลา (นาท)	pH 7					pH 10				
	$\Delta$ mtheo (mg/l)	Al ที่เหลือ (mg/l)	Al ที่ใช้ไป (mg/l)	Al ที่ใช้ไป (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าใช้จ่าย (บาท/m <sup>3</sup> )	$\Delta$ mtheo (mg/l)	Al ที่เหลือ (mg/l)	Al ที่ใช้ไป (mg/l)	Al ที่ใช้ไป (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าใช้จ่าย (บาท/m <sup>3</sup> )
10	24.86	12.66	12.20	0.0122	47.98	24.98	12.66	12.32	0.0123	43.84
20	49.71	17.69	32.02	0.0320	94.41	49.96	17.69	32.27	0.0323	87.06
30	74.57	18.73	55.84	0.0558	141.61	74.94	18.73	56.21	0.0562	132.47
40	99.43	21.86	77.57	0.0776	191.93	99.92	21.86	78.07	0.0781	177.88
50	124.28	55.75	68.53	0.0685	241.46	124.28	55.75	68.53	0.0685	225.13
60	149.14	39.53	109.61	0.1096	291.62	149.89	39.53	110.36	0.1104	270.57

ตารางที่ 4-10 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายจากการเดินระบบ EC ด้วยแผ่นอลูมิเนียม ที่กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์

เวลา (นาท)	pH 7					pH 10				
	$\Delta$ mtheo (mg/l)	Al ที่เหลือ (mg/l)	Al ที่ใช้ไป (mg/l)	Al ที่ใช้ไป (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าใช้จ่าย (บาท/m <sup>3</sup> )	$\Delta$ mtheo (mg/l)	Al ที่เหลือ (mg/l)	Al ที่ใช้ไป (mg/l)	Al ที่ใช้ไป (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าใช้จ่าย (บาท/m <sup>3</sup> )
10	37.35	8.67	28.68	0.0287	86.35	37.41	8.67	28.74	0.0287	101.48
20	74.69	13.18	61.51	0.0615	171.30	74.82	13.18	61.64	0.0616	202.48
30	112.23	14.19	98.04	0.0980	257.37	112.23	14.19	98.04	0.0980	307.24
40	149.64	20.38	129.26	0.1293	347.85	149.64	20.38	129.26	0.1293	405.91
50	187.05	32.24	154.81	0.1548	438.32	187.05	32.24	154.81	0.1548	510.89
60	224.46	35.13	189.32	0.1893	521.77	224.46	35.13	189.32	0.1893	634.14



## บทที่ 5

### สรุปผล

#### สรุปผลการทดลอง

1. การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า พบว่า การเดินระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (EC) ด้วยแผ่นเหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ ระยะเวลา 30 นาที เป็นสถานะการเดินระบบที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเชิงคุณลักษณะของน้ำที่บำบัด และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด

2. กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (EC) ตามด้วยกระบวนการเพนต์ที่เงื่อนไขการทดลอง คือ การใช้ EC แผ่นเหล็ก ที่ pH 10 ตามด้วยการเติม  $H_2O_2$  ที่ความเข้มข้น 50 mg/L ทำให้คุณลักษณะของพารามิเตอร์ต่างๆ ในเสียได้ขึ้นได้แก่ ค่าสี ความขุ่น การกำจัดโลหะหนักในรูปตะกั่ว (Pb) และโครเมียม (Cr) แต่จะทำให้ค่า COD และ sCOD ในตัวอย่างน้ำเพิ่มสูงขึ้น

3. การวิเคราะห์หาต้นทุนการดำเนินการ พบว่า การบำบัดน้ำเสียการเดินระบบ EC ด้วยแผ่นเหล็ก ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ ค่า pH 10 ระยะเวลา 30 นาที มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดเพียง 47.36 บาท/ $m^3$  เมื่อเทียบกับการเดินระบบด้วยเงื่อนไขการทดลองอื่นๆ

#### ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำโดยใช้เครื่อง HPLC
2. การศึกษาผลกระทบของการเติม  $H_2O_2$  ที่ส่งผลต่อการชะละลายของโลหะหนักในน้ำ

## เอกสารอ้างอิง

- ชนิษฐา ชัยรัตน์วารณ. (2550). ประเภทของสีย้อม. สืบค้นเมื่อ 20 มิถุนายน 2560, เข้าถึงได้จาก [http://www.tpa.or.th/writer/read\\_this\\_book\\_topic.php?pageid=6&bookID=370&read=true&count=true](http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=6&bookID=370&read=true&count=true)
- พัชรินทร์ นาคหล่อ. (2557). รู้จักเทคโนโลยีเฟนตัน (Fenton Technology) ในระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ.
- วนิดา ชูอักษร. (2555). เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 17(1), 181-191.
- ศุภมาส ด้านวิทยากุล. (2557). การตกตะกอนด้วยไฟฟ้ากับการบำบัดน้ำเสีย. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, 35-41.
- ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2556). คู่มือแนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. โครงการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งเฉพาะประเภทอุตสาหกรรมเพื่อปรับปรุงค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (ภายใต้ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีระบบการผลิตสีเขียวให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและชุมชน). กรุงเทพฯ: กรมโรงงานอุตสาหกรรม.
- สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ และ วีระนุช บุญรุ่ง. (2553). การกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการสร้างตะกอนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม. วิศวกรรมสาร มก., 10-16.
- อังคณา ปัญญาอ่อนง. (2550). การกำจัดสีรีแอกทีฟบลูโดยกระบวนการบำบัดทางไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Amini M., Arami M., Mahnoodi N. M. and Akbari A. (2011). Dye removal from colored textile wastewater using acrylic grafted nanomembrane. *Desalination* 267(1), 107–113.
- Cardoso J. C., Bessegato, G. G. and Zanoni, M. V. B. (2016). Efficiency comparison of ozonation, photolysis, photocatalysis and photoelectrocatalysis methods in real textile wastewater decolorization. *Water Research*, 98(1), 39-46.
- Cerqueira A., Russo, C. and Marques, M.R.C. (2009). Electroflocculation for textile wastewater treatment. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 26(4), 659-668.
- Charoenlarp K. and Choyphan W. (2009). Reuse of dye wastewater through colour removal with electrocoagulation process. *Asian Journal on Energy and Environment*, 10(04), 250-260.
- Chaudhary R. and Sahu O. P. (2013). Treatment of sugar waste water by electrocoagulation. *Journal of Atmospheric Pollution*, 1(1), 5-7.
- Elabbas S., Ouazzani N., Mandi L., Berrekhis F., Perdicakis M. Pontvianne S., Pons M-N., Lapique F. and Leclerc J-P. (2016). Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation: influence of the quality of aluminium used for the electrode. *Journal of Hazardous Materials*, 319, 69–77.
- Ghanbari F. and Moradi M. (2015). A comparative study of electrocoagulation, electrochemical Fenton, electro-Fenton and peroxi-coagulation for decolorization

- of real textile wastewater: electrical energy consumption and biodegradability improvement. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 3(1), 499–506.
- Hanay Ö. and Hasar H. (2011). Effect of anions on removing  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  and  $\text{Zn}^{2+}$  in electrocoagulation process using aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 189(1-2), 572–576.
- Jager, D. De., Sheldon, M.S. and Edwards, W. (2014). Colour removal from textile wastewater using a pilot-scale dual-stage MBR and subsequent RO system. *Separation and Purification Technology* 135, 135–144.
- Joo, D. J., Shin, W. S., Choi, J.-H., Choi, S. J., Kim, M.-C., Han, M.H., Ha, T. W. and Kim, Y.-H. (2007). Decolorization of reactive dyes using inorganic coagulants and synthetic polymer. *Dyes and Pigments* 73(1), 59-64.
- Katukiza A.Y., Ronteltap M., Niwagaba, C.B., Kansime, F. and Lens, P.N.L. (2014). Grey water treatment in urban slums by a filtration system: Optimisation of the filtration medium. *Journal of Environmental Management* 146, 131-141.
- Khandegar V. and Saroha A. K. (2013). Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent: a review. *Journal of Environmental Management*, 128, 949-963.
- Khouni I., Marrot B., Moulin, P. and Amar, R. B. (2011). Decolourization of the reconstituted textile effluent by different process treatments: enzymatic catalysis, coagulation/flocculation and nanofiltration processes. *Desalination* 268(1-3), 27–37.
- Koby M., Can O. T. and Bayramoglu M. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 100(1-3), 163–178.
- Koby M. and Demirbas E. (2015). Evaluations of operating parameters on treatment of can manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Journal of Water Process Engineering*, 8, 64–74.
- Koby M., Gengec E. and Demirbas E. (2016). Operating parameters and costs assessments of a real dyehouse wastewater effluent treated by a continuous electrocoagulation process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 101, 87–100.
- Mahmoud M. S., Farah J. Y. and Farrag T. E. (2013). Enhanced removal of Methylene Blue by electrocoagulation using iron electrodes. *Egyptian Journal of Petroleum*, 22(1), 211–216.
- Mahmoodi N. M., Salehi R. and Arami M. (2011). Binary system dye removal from colored textile wastewater using activated carbon: kinetic and isotherm studies. *Desalination*, 272(1-3), 187-195.
- Mores R., Treichel H., Zakrzewski C. A., Kunz A., Steffens J. and Dallago R. M. (2016). Remove of phosphorous and turbidity of swine wastewater using electrocoagulation under continuous flow. *Separation and Purification Technology*, 171, 112–117.

- Nandi B.K. and Patel S. (2017). Effects of operational parameters on the removal of brilliant green dye from aqueous solutions by electrocoagulation. *Arabian Journal of Chemistry*, S2961-S2968.
- Pajootan E., Arami, M. and Mahmoodi, N. M. (2012). Binary system dye removal by electrocoagulation from synthetic and real colored wastewaters. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 43(2), 282–290.
- Parsa J. B., Vahidian H.R., Soleymani A.R. and Abbasi M. (2011). Removal of Acid Brown 14 in aqueous media by electrocoagulation: optimization parameters and minimizing of energy consumption. *Desalination*, 278(1-3), 295–302.
- Riera-Torres M., Gutiérrez-Bouzán C. and Crespi M. (2010). Combination of coagulation–flocculation and nanofiltration techniques for dye removal and water reuse in textile effluents. *Desalination*, 252(1-3), 53–59.
- Shafaei A., Pajootan, E., Nikazar M. and Arami, M. (2011). Removal of Co (II) from aqueous solution by electrocoagulation process using aluminum electrodes. *Desalination*, 279, 121–126.
- Somens C. A., Simionatto, E.L., Bertoli, S.L., Wisniewski, A.Jr. and Radetski, C.M. (2010). Use of ozone in a pilot-scale plant for textile wastewater pre-treatment: physico-chemical efficiency, degradation by-products identification and environmental toxicity of treated wastewater. *Journal of Hazardous Materials* 175(1-3), 235–240.
- Zewail T.M. and Yousef N.S. (2014). Chromium ions ( $\text{Cr}^{6+}$  &  $\text{Cr}^{3+}$ ) removal from synthetic wastewater by electrocoagulation using vertical expanded Fe anode. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 735, 123–128.
- Zhang F., Chen X., Wu F. and Ji Y. (2016). High adsorption capability and selectivity of ZnO nanoparticles for dye removal. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 509(20), 474–483.
- Zhang J., Zhou Y., Jiang M., Li J. and Sheng J. (2015). Removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption on pyrophyllite. *Journal of Molecular Liquids* 209, 267–271.

### ภาคผนวก

ตารางที่ ผ-1 ค่า pH กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 7

Time (min)	pH		
	2A	4A	6A
0	7.01	7.09	7.08
10	7.06	7.21	7.42
20	7.23	7.42	8.61
30	7.35	8.39	9.30
40	7.52	9.01	9.64
50	7.84	9.35	10.06
60	8.69	9.52	10.22

ตารางที่ ผ-2 ค่า pH กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 10

Time (min)	pH		
	2A	4A	6A
0	10.07	10.05	10.09
10	9.95	9.90	10.06
20	9.88	9.99	10.21
30	9.98	10.13	10.43
40	10.08	10.26	10.62
50	10.13	10.38	10.80
60	10.28	10.47	10.87

ตารางที่ ผ-3 ค่า pH กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7

Time (min)	pH		
	2A	4A	6A
0	7.08	7.03	7.01
10	7.44	7.34	7.71
20	7.52	7.92	8.32
30	7.92	8.32	8.71
40	8.14	8.51	8.81
50	8.30	8.80	8.94
60	8.55	8.88	9.08

ตารางที่ ผ-4 ค่า pH กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10

Time (min)	pH		
	2A	4A	6A
0	10.02	10.04	9.95
10	9.96	9.69	9.55
20	9.79	9.34	9.30
30	9.62	9.28	9.32
40	9.44	9.32	9.34
50	9.32	9.32	9.39
60	9.30	9.34	9.42

ตารางที่ ผ-5 ค่า TDS กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 7

Time (min)	TDS (ppm)		
	2A	4A	6A
0	1,093.67	1,101.00	1,018.33
10	1,106.33	1,091.00	1,053.67
20	1,124.33	1,094.33	1,048.33
30	1,158.00	1,086.00	1,049.33
40	1,144.33	1,081.67	1,040.67
50	1,138.67	1,094.33	1,058.00
60	1,107.00	1,101.00	1,067.67

ตารางที่ ผ-6 ค่า TDS กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 10

Time (min)	TDS (ppm)		
	2A	4A	6A
0	961.00	1,004.00	933.33
10	979.00	994.33	993.67
20	993.00	973.67	990.33
30	960.33	985.00	1,028.00
40	968.33	1,001.33	1,041.67
50	977.00	1,015.33	1,073.00
60	987.00	1,034.00	1,111.00

ตารางที่ ผ-7 ค่า TDS กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7

Time (min)	TDS (ppm)		
	2A	4A	6A
0	1157.00	1076.33	1007.33
10	1153.33	1068.67	1012.00
20	1151.33	1076.33	998.67
30	1154.00	1073.00	991.00
40	1142.67	1063.67	980.33
50	1145.00	1045.33	981.00
60	1132.67	1054.33	970.67

ตารางที่ ผ-8 ค่า TDS กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10

Time (min)	TDS (ppm)		
	2A	4A	6A
0	1021.33	1033.33	1090.00
10	1017.67	1031.67	1049.33
20	1004.00	1009.33	1046.33
30	989.67	988.67	1036.00
40	979.00	997.00	1027.33
50	973.67	986.33	1033.33
60	974.33	993.67	1031.67



ตารางที่ ผ-9 ค่า Conductivity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 7

Time (min)	Conductivity ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		
	2A	4A	6A
0	2326.33	2342.00	2166.00
10	2353.33	2321.00	2241.33
20	2391.67	2328.00	2230.33
30	2463.00	2310.00	2232.00
40	2434.33	2301.33	2214.00
50	2422.00	2328.00	2250.67
60	2355.00	2342.00	2270.67

ตารางที่ ผ-10 ค่า Conductivity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 10

Time (min)	Conductivity ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		
	2A	4A	6A
0	2044.33	2135.67	1985.33
10	2048.67	2115.00	2114.00
20	2112.33	2071.33	2106.67
30	2042.67	2095.33	2186.67
40	2059.67	2129.67	2215.67
50	2078.00	2158.33	2282.00
60	2099.67	2200.00	2362.67

ตารางที่ ผ-11 ค่า Conductivity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7

Time (min)	Conductivity ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		
	2A	4A	6A
0	2461.00	2296.33	2142.67
10	2453.33	2273.00	2152.67
20	2449.00	2289.33	2123.00
30	2455.00	2282.00	2108.33
40	2430.67	2262.67	2085.33
50	2436.00	2242.67	2086.33
60	2409.33	2242.67	2064.33

ตารางที่ ผ-12 ค่า Conductivity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10

Time (min)	Conductivity ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		
	2A	4A	6A
0	2172.33	2236.67	2319.00
10	2164.67	2195.00	2232.33
20	2135.67	2146.67	2225.67
30	2105.33	2103.00	2204.00
40	2082.33	2121.00	2185.67
50	2070.67	2098.00	2198.33
60	2072.33	2114.00	2194.67

ตารางที่ ผ-13 ค่า Turbidity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 7

Time (min)	Turbidity (NTU)		
	2A	4A	6A
0	13.43	8.75	10.33
10	68.73	105.00	49.03
20	59.90	46.43	26.77
30	53.00	33.30	19.17
40	47.90	23.07	19.07
50	33.40	20.97	20.83
60	27.50	22.00	17.80

ตารางที่ ผ-14 ค่า Turbidity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 10

Time (min)	Turbidity (NTU)		
	2A	4A	6A
0	17.00	14.53	10.02
10	27.53	43.03	30.80
20	43.23	41.30	28.30
30	58.10	38.23	36.80
40	41.03	40.23	33.60
50	31.27	46.57	31.93
60	31.90	46.43	32.83

ตารางที่ ผ-15 ค่า Turbidity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7

Time (min)	Turbidity (NTU)		
	2A	4A	6A
0	58.87	117.33	78.40
10	33.13	24.83	13.47
20	26.17	22.70	9.90
30	25.30	19.13	7.32
40	17.10	12.27	5.83
50	16.77	9.42	5.71
60	14.47	7.59	5.04

ตารางที่ ผ-16 ค่า Turbidity กับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10

Time (min)	Turbidity (NTU)		
	2A	4A	6A
0	80.27	50.47	110.67
10	23.33	18.10	21.20
20	32.43	10.20	12.40
30	21.60	10.50	8.71
40	16.97	17.90	8.35
50	15.77	13.43	6.93
60	14.43	6.96	6.68

**ตารางที่ ผ-17** การกำจัดสีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 7

Time (min)	Color Removal (%)		
	2A	4A	6A
0	0.00	0.00	0.00
10	28.68	64.65	73.33
20	56.16	89.45	95.32
30	87.36	94.39	98.05
40	91.48	95.98	98.46
50	93.99	96.95	98.00
60	95.80	97.53	98.61

**ตารางที่ ผ-18** การกำจัดสีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 10

Time (min)	Color Removal (%)		
	2A	4A	6A
0	0.00	0.00	0.00
10	33.34	82.07	78.45
20	86.33	92.67	97.14
30	90.48	95.76	98.41
40	93.53	96.92	98.35
50	95.46	97.37	99.13
60	96.74	97.37	99.31

ตารางที่ ผ-19 การกำจัดสีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC ผ่านอลูมิเนียมที่ pH 7

Time (min)	Color Removal (%)		
	2A	4A	6A
0	0.00	0.00	0.00
10	55.20	36.95	37.76
20	39.90	29.17	44.47
30	36.86	31.85	49.03
40	37.76	35.61	51.71
50	37.22	31.05	54.40
60	38.29	42.05	60.03

ตารางที่ ผ-20 การกำจัดสีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC ผ่านอลูมิเนียมที่ pH 10

Time (min)	Color Removal (%)		
	2A	4A	6A
0	0.00	0.00	0.00
10	47.15	22.79	58.08
20	32.12	20.53	45.21
30	44.02	11.56	42.58
40	46.61	14.15	44.49
50	38.83	18.04	47.11
60	34.54	21.61	50.93

ตารางที่ ผ-21 การกำจัดซีโอดีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 7

Time (min)	COD Removal (%)		
	2A	4A	6A
0	0.00	0.00	0.00
10	90.05	31.44	88.24
20	84.38	56.14	92.44
30	87.08	40.42	90.15
40	88.16	71.86	90.53
50	84.92	52.40	93.20
60	82.77	65.87	94.35

ตารางที่ ผ-22 การกำจัดซีโอดีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นเหล็กที่ pH 10

Time (min)	COD Removal (%)		
	2A	4A	6A
0	0.00	0.00	0.00
10	48.48	81.12	92.33
20	84.18	82.00	91.21
30	72.73	86.53	93.93
40	85.86	87.93	93.08
50	94.28	86.18	96.46
60	99.33	81.12	92.71

ตารางที่ ผ-23 การกำจัดซีโอดีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 7

Time (min)	COD Removal (%)		
	2A	4A	6A
0	0.00	0.00	0.00
10	70.99	85.70	88.87
20	68.30	85.70	89.78
30	74.29	87.14	87.43
40	71.81	85.29	86.34
50	77.59	84.26	90.32
60	68.30	66.17	88.51

ตารางที่ ผ-24 การกำจัดซีโอดีกับเวลาในการทำปฏิกิริยา EC แผ่นอลูมิเนียมที่ pH 10

Time (min)	COD Removal (%)		
	2A	4A	6A
0	0.00	0.00	0.00
10	79.92	74.84	81.24
20	77.42	92.49	82.10
30	85.25	93.61	87.51
40	94.24	84.45	84.24
50	70.43	95.40	72.83
60	80.42	84.23	79.82



ตารางที่ ผ-25 ผลการวิเคราะห์ค่า pH โดยกระบวนการเฟนตัน

Conc. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	pH		
	EC <sub>Fe</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fe <sup>2+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fe <sup>3+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
0	9.9	10.0	9.5
50	9.7	9.8	9.4
100	9.6	9.6	9.3
150	9.5	9.6	9.3
200	9.5	9.5	9.2
250	9.4	9.4	9.1

ตารางที่ ผ-26 ผลการวิเคราะห์ค่า TDS โดยกระบวนการเฟนตัน

Conc. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	TDS (ppm)		
	EC <sub>Fe</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fe <sup>2+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fe <sup>3+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
0	1043.2	1033.3	1077.5
50	1020.3	1024.0	1083.7
100	1007.0	1022.8	1084.8
150	1000.5	1024.5	1083.2
200	995.5	1014.7	1078.7
250	992.5	1014.3	1064.5

ตารางที่ ผ-27 ผลการวิเคราะห์ค่า Conductivity โดยกระบวนการเฟนตัน

Conc. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	Conductivity (μs/cm)		
	EC <sub>Fe</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fe <sup>2+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fe <sup>3+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
0	2219.0	2215.3	2292.0
50	2170.7	2178.8	2305.3
100	2142.3	2175.8	2309.5
150	2128.2	2180.0	2304.2
200	2117.7	2162.0	2294.7
250	2111.0	2157.5	2264.3

ตารางที่ ผ-28 ผลการวิเคราะห์ค่า Turbidity โดยกระบวนการเฟนตัน

Conc. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	Turbidity (NTU)		
	EC <sub>Fe</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fe <sup>2+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fe <sup>3+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
0	15.3	9.3	0.8
50	3.8	1.6	0.4
100	3.5	1.9	0.5
150	4.4	2.1	0.5
200	6.9	2.3	0.4
250	3.9	2.4	0.5

ตารางที่ ผ-29 ผลการวิเคราะห์ค่าสีโดยกระบวนการเฟนตัน

Conc. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	Color (mg/L Pt)		
	EC <sub>Fe</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fe <sup>2+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fe <sup>3+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
0	6.3	42.7	61.1
50	0.5	20.1	18.6
100	0.4	15.8	16.8
150	0.7	13.7	16.9
200	1.6	12.0	15.2
250	4.3	11.6	10.8

ตารางที่ ผ-30 ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีโดยกระบวนการเฟนตัน

Conc. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	COD (mg/L)		
	EC <sub>Fe</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fe <sup>2+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fe <sup>3+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
0	73.3	55.4	81.1
50	142.5	256.0	203.3
100	279.2	433.8	330.6
150	487.1	541.0	467.2
200	581.7	794.9	615.0
250	708.8	862.1	756.7

ตารางที่ ผ-31 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีละลายน้ำโดยกระบวนการเฟนตัน

Conc. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	sCOD (mg/L)		
	EC <sub>Fe</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fe <sup>2+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fe <sup>3+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
0	84.5	59.7	34.4
50	175.8	168.6	151.7
100	319.2	302.4	300.6
150	421.3	414.1	421.1
200	545.8	573.6	572.2
250	687.9	695.8	665.0